OAMK
OULUN AMMATTIKORKEAKOULU

Oskari Mäkimartti

PAINETTAVAN PINNOITTEEN TUOTANNOLLISTAMINEN

PAINETTAVAN PINNOITTEEN TUOTANNOLLISTAMINEN

Oskari Mäkimartti

Opinnäytetyö

Kevät 2016

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma, tuotantotalous

Tekijä: Oskari Mäkimartti
Opinnäytetyön nimi: Painettavan pinnoitteen tuotannollistaminen
Työn ohjaaja: Jari Viitala
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2016 Sivumäärä: 74 + 2 liitettä

Työ tehtiin Optitune Oy:n toimeksiannosta yhteystyössä PrinLabin sekä VTT:n kanssa kesä- ja syyskuun aikana Optitune Oy:n, PrinLabin ja VTT:n tiloissa. Tavoitteena työssä oli kehitettävien materiaalien tuotannollistaminen käyttäen hyväksi rullalta rullalle -prosessia (roll-to-roll). Työssä perehdyttiin kehitettävien materiaalien testilaboratorioympäristöön, rullalta rullalle -prosessiin sekä erilaisiin painomenetelmiin.

Työ toteutettiin kahdessa tuotantoympäristössä. Oulun ammattikorkeakoulun PrinLabissa tutkittiin kehitettävien materiaalien soveltuvuutta syväpainomenetelmän kanssa PrinLabin SOM100-painokoneella. VTT:n MAXI-painokoneella tutkittiin materiaalien soveltuvuutta massatuotantoon materiaalin pinnoittamisesta, laminoinnista sekä valmiiden kappaleiden leikkaamiseen asti. PrinLabin SOM100-painokone ajoa varten suunniteltiin testit sekä testimatriisit rullalta arkille -prosessina ja rullalta rullalle -prosessina. VTT:n MAXI-painokone ajoissa tutkittiin materiaalin soveltuvuutta massatuotantoon rullalta rullalle -prosessina rakosuulaake- (slot-die) ja mayer rod -pinnoitusmenetelmän kanssa sekä pinnoitetun PET-kalvon laminoitavuutta ja leikattavuutta.

SOM100-painokoneen testien perusteella todettiin, että kehitettävä materiaali soveltuu syväpainoprosessiin, mutta painojälki ei ole visuaalisesti slot-die-pinnoituksen tasoinen. SOM100-painokone ei kuitenkaan sovellu kehitettävien materiaalien prosessoimiseen sen nykyisellä laitekannalla. MAXI-testeissä todettiin, että kehitettävät materiaalit voidaan pinnoittaa, prosessoida, laminoida sekä leikata MAXI-painokonelinjastolla.

Asiasanat: painomenetelmät, pinnoitus, materiaalitutkimus, prosessointi, prosessitekniikka, tulostettava elektroniikka

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree program in Mechanical and Production Engineering, Production Economics

---

Author: Oskari Mäkimartti
Title of thesis: Industrializing of Printed Coating
Supervisor: Jari Viitala
Term and year when the thesis was submitted: spring 2016 Pages: 74 + 2 appendices

---

This thesis was commissioned by Optitune Oy and it was carried out in cooperation of PrinLab and VTT between the summer and autumn of 2015. The objective of the thesis was to industrialize the developed materials using the roll-to-roll (R2R) process. During the thesis work, the thesis author became familiar with the test laboratory of the developed materials as well as with the roll-to-roll process and the different printing methods which were used in the work.

The thesis was carried out in two different manufacturing environments. The coating materials were tested with PrinLab's smaller scale SOM100-R2R printing machine by gravure printing. With the MAXI printing line, the objective was to study the suitability of the developed printing materials for roll-to-roll mass production by coating the substrate, by laminating the coated substrate and by cutting the film into the desired design. For smaller scale tests with PrinLab's R2R printing machine, the test runs and test matrices were planned to be carried out as roll-to-sheet and roll-to-roll process tests. For the MAXI printing line test, the test runs were designed for slot-die and mayer rod coating methods. In addition, the die-cut tools for iPhone 5 screen protectors were designed.

On the basis of the SOM100-R2R printing machine tests, it could be concluded that the developed materials are suitable for the gravure printing process but the visual quality of the printed coating is not as good as the slot-die coated coatings. The SOM100-R2R printing machine is not suitable for processing of the developed materials with the machinery it has at the moment. On the basis of the MAXI printing line tests, it was concluded that the developed materials can be successfully coated, processed, laminated and cut with the MAXI printing line.

Keywords: printing techniques, coating, material development, processing, printed electronics

SISÄLLYS

1 JOHDANTO

Optitune Oy on kemianteollisuuden yritys, joka valmistaa ja kehittää nanopinnoitteita erilaisille lasi- ja muovipinnoille. Sen tuotevalikoimaan kuuluu pinnoitteita muun muassa kosketusnäyttöihin, elektroniikkaan sekä aurinkopaneeleihin. Yritys toimii Oulussa Linnanmaalla Suomen tutkimuslaitos VTT:n toimitiloissa ja työllistää 22 henkilöä Oulun toimistossa. (1.)

Työ on tehty Optitune Oy:n Oulun toimipisteessä, jossa kehitetään ja valmistetaan pinnoitteita laseille ja muoveille. Työn kohteena ovat muovialustalle kehitettävät pinnoitemateriaalit, jotka tuotannollistetaan rullalta rullalle -prosessina erilaisin pinnoitus- ja painomenetelmin. Optitune Oy on kehittänyt ja testannut materiaaleja laboratorioympäristössä, mutta ne tuli myös pystyä siirtämään tuotantoympäristöön rullalta rullalle -prosessina menettämättä vaadittuja kalvon ominaisuuksia, joita saadaan aikaan laboratoriotesteissä.

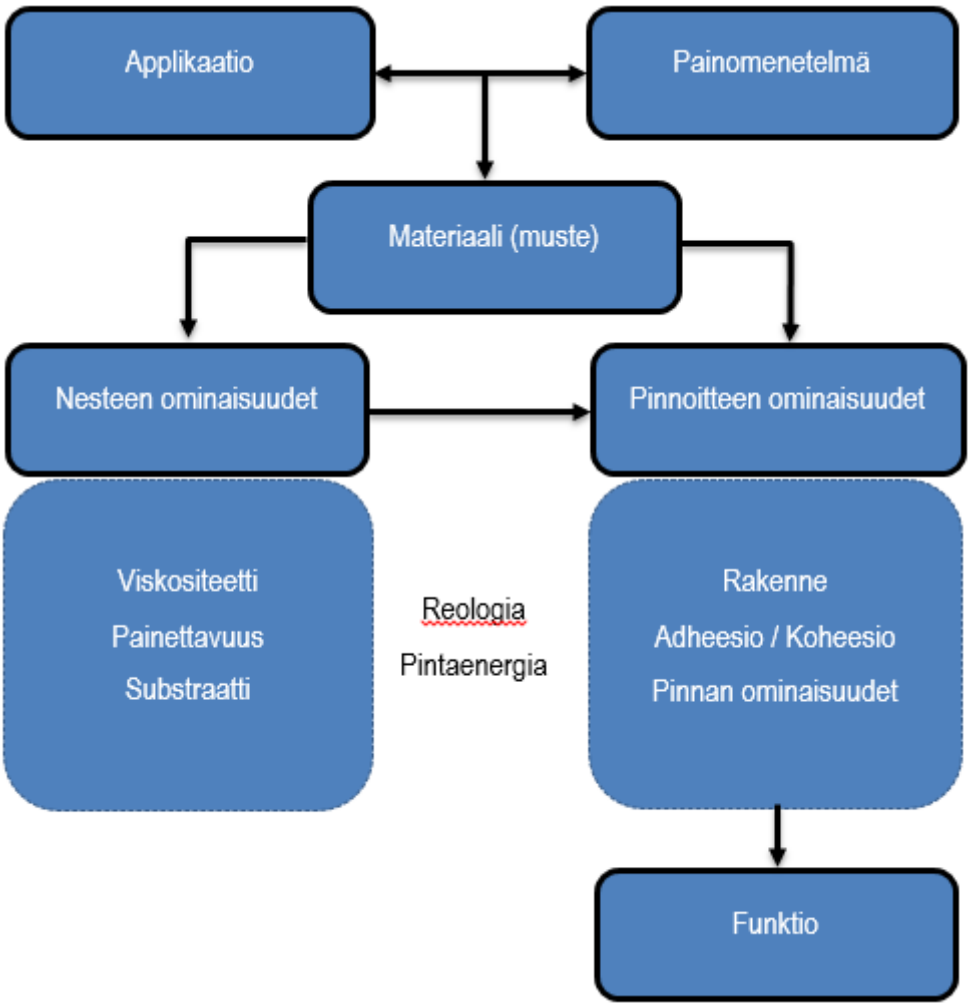
Laboratorioympäristöstä siirtyminen tuotantoon on haasteellista, koska laboratoriossa käytettävät painomenetelmät ja prosessointivälineet eivät täsmää VTT:n MAXI-painokoneen välineistöön ja käytetyt prosessointiparametritkaan eivät ole samoja. Yritys halusi myös materiaalit testiin PrinLabin SOM100-painokoneeseen, joka on kooltaan huomattavasti pienempi kuin VTT:n MAXI-painokone, jolloin materiaaleja pystyttäisiin testaamaan rullalta rullalle -prosessissa laboratorioympäristössä pienemmin kustannuksin ja joustavammin. Näin kehittyi myös aihe opinnäytetyölle. Painokoneiden testiajot toteutettiin Optitune Oy:n projektiryhmän, työn yhdyshenkilön ja projektin projektipäällikön Johnny Pehkosen kanssa sekä VTT:n ja PrinLabin yhdyshenkilöiden kanssa.

Työssä on tutkittu kehitettävien materiaalien soveltuvuutta rullalta rullalle -tuotantoon, selvitetty prosessin painoparametrit sekä laitteistojen soveltuvuus materiaaleille. Yhtenä työn tavoitteena oli myös saada valmistettua demokappaleita testiajojen tuloksena.

2 PAINETTAVA PINNOITE

Työssä käytettävä pinnoitemateriaali on Optitune Oy:n kehittämä materiaali, joka on kehitetty soveltuvaksi muovisubstraatille pinnoitettavaksi. Materiaali on kehitetty soveltuvaksi rullalta rullalle -prosessiin, jossa voidaan käyttää erilaisia paino- sekä pinnoitusmenetelmiä materiaalin siirtämiseksi substraatille. Rullalta rullalle -prosessissa materiaalia voidaan käyttää moniin eri applikaatioihin sen ominaisuuksiensa ja prosessin tuomien etujen vuoksi. Opinnäytetyössä keskitytään kovapinnoitemateriaaliin, jonka applikaationa on esimerkiksi älypuhelimen näytönsuojakalvo.

Kuvassa 1 on yleiskaavio painettavan materiaalin valintaan painettavassa elektroniikassa. Valittu applikaatio ja sille haluttu painomenetelmä määräävät painettavan materiaalin komposition. Nesteen fysikaaliset ominaisuudet ovat sopivia osalle painoprosesseista, mutta eivät kaikille. Samalla tavalla painetun materiaalin fysikaaliset ominaisuudet sopivat joihinkin applikaatioihin mutta eivät kaikkiin. Painetun materiaalin funktion selvittämiseksi vaaditaan painoprosessin vaatimusten sekä nesteen ominaisuuksien ymmärtämistä, jotta saadaan aikaan haluttu applikaatio. (2, s. 172.)



KUVA 1. Applikaation kehittämisen kaavio, joka perustuu painomenetelmään, materiaalin ominaisuuksiin ja rakenteen funktioon (2, s. 173)

Reologia ja pintaenergia ovat molemmat nesteen sekä pinnoitteen ominaisuuksia. Ne vaikuttavat suuresti materiaalin painettavuuteen. Painettavuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat viskositeetti, substraatti, pinnoitteen rakenne, adheesio, koheesio sekä pinnan ominaisuudet. (2, s. 173.)

2.1 Painetun pinnan mitattavat ominaisuudet

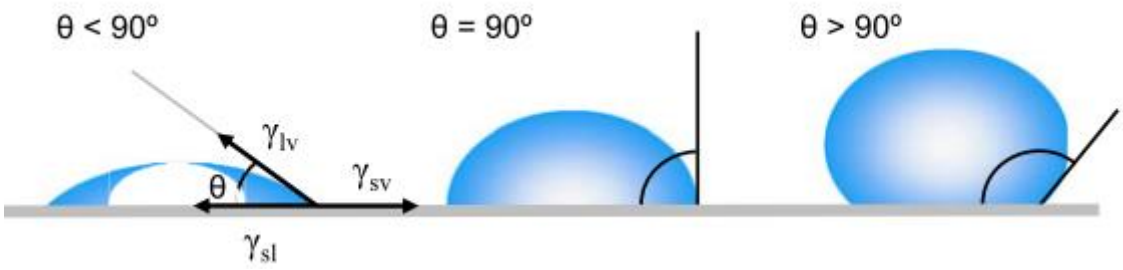
Työssä käytettyjen Optitune Oy:n pinnoitteiden on tarkoitus antaa substraatin pinnalle lisää kovuutta, hankauskestävyyttä sekä hydrofobisia ominaisuuksia. Joustavuus on myös tärkeä ominaisuus pinnoitteelle, koska pinnoite on tarkoitettu rullalta rullalle -prosessiin. Pinnoitteen joustavuus myös mahdollistaa sen käytön erilaisiin joustavan elektroniikan applikaatioihin (flexible electronics).

Pinnoitteen ominaisuuksia pystyttiin työn aikana mittaamaan Optitune Oy:n laboratoriossa, jossa on pinnoitteen hydrofobisuuden mittausta varten kontaktikulmamittari, kulumiskestävyyttä kuvaava Taber-mittauslaite sekä kovuuden mittaamisen PEHA-mittausvälineet (pencil hardness).

2.1.1 Kontaktikulma

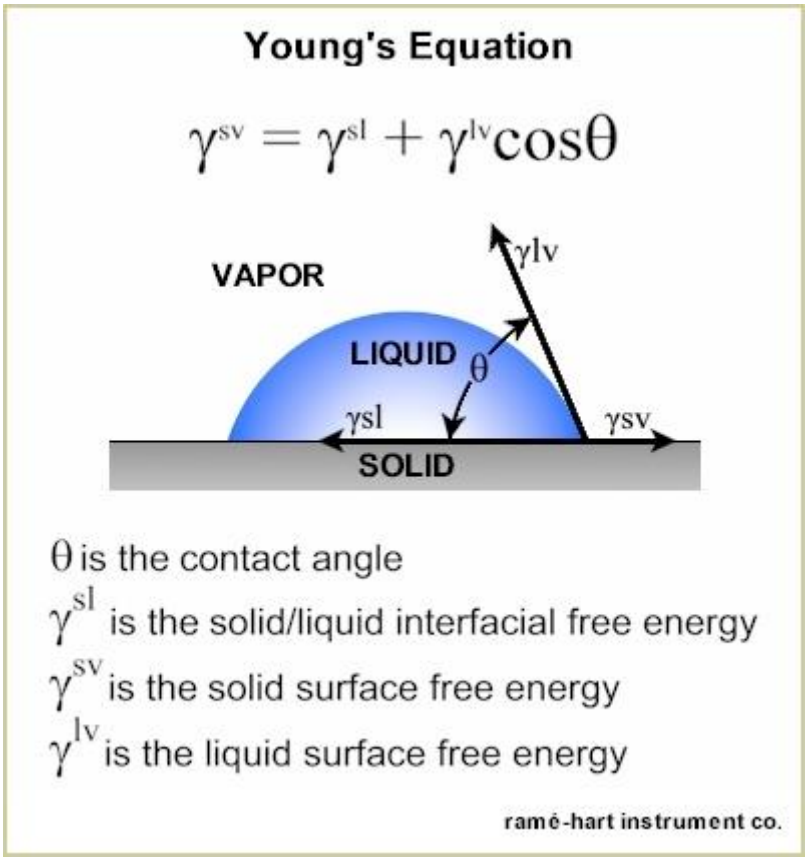
Pinnan kastumisella on nykyisin iso rooli teollisuuden prosesseissa kuten voitelussa, pinnoituksessa ja painatuksessa. Lähivuosina superhydrofobisten pintojen tutkiminen on lisääntynyt niiden applikaatiomahdollisuuksien vuoksi. Pinnan kastumisen tutkimisessa kontaktikulma on tärkein seurattava mittayksikkö. Kontaktikulma kuvaa kastumisen astetta, kun neste on kosketuksessa pintaan. Pieni kontaktikulma eli alle 90° nesteen ja kiinteän pinnan välinen kontaktikulma kuvaa hyvää kastumista, kun taas suuri eli yli 90° kontaktikulma kuvaa huonoa kastumista. (3, s. 3.)

Kuvassa 2 nähdään nesteen ja pinnan kontaktikulman olevan pieni, kun neste leviää pinnalla. Alle 90° kontaktikulma kuvaa hyvää kastumista eli neste leviää suurelle alueelle pinnalla. Yli 90° kontaktikulma taas yleensä tarkoittaa että neste ei kastuta pintaa kunnolla, jolloin neste minimoi kontaktin pinnan kanssa muodostaen pisaran. Kontaktikulman ollessa 0° voidaan pintaa sanoa täysin kastuneeksi. Superhydrofobiset pintojen kontaktikulmat ovat yleensä yli 150°, jolloin nesteen ja pinnan välinen kontakti on hyvin vähäistä. (3, s. 4.)



KUVA 2. Erilaisia kontaktikulmia nestepisaran sekä tasaisen pinnan välillä (3, s. 4)

Kontaktikulma voidaan mitata lisäämällä tippa nestettä kiinteälle pinnalle. Nesteen ja kiinteän pinnan välistä kulmaa sekä nesteen ja ilman välistä kulmaa kutsutaan kontaktikulmaksi. Yleisin kontaktikulman mittaustapa on kuvata pisaran profiilia ja mitata kaksiulotteisesta kuvasta kulma, joka syntyy kiinteän pinnan ja pisaran välille kolmen energiajanan avulla kuvan 3 mukaisesti. Young's kaavaa käytetään kuvaamaan koheesion ja adheesion vuorovaikutuksia sekä mittaamaan pintaenergiaa. (4, linkit Technical Information -> Contact Angle.)



KUVA 3. Nesteen ja kiinteän pinnan kontaktikulman mittaus kuvattuna Young's kaavan mukaan (4, linkit Technical Information -> Contact Angle)

2.1.2 Kovuus

Pinnoitteen kovuus on sen kyky estää kovan esineen aiheuttamaa tunkeumaa, naarmuuntumista, leikkausta tai lävistystä. Erilaiset tavat arvioida kovuutta antavat erilaisia tuloksia, koska ne mittaavat materiaalin eri ominaisuuksia. Ei ole olemassa absoluuttista kovuuden asteikkoa, jokaisella kovuuden mittaustavalla on omat kovuuden asteikot. Kovuuden selvittäminen kaivertamalla tai naarmuttamalla pinnoitetta erikovuisilla lyijykynillä on helppoa ja halpaa. Se on myös laajalti käytetty tapa kehitystyössä ja tuotannon laadun testaamisessa. (5, s. 8.)

PEHA-testi eli Pencil Hardness -testi on käytetty kalvo teollisuudessa jo monia vuosia. PEHA-testin avulla pystytään selvittämään pinnoitetun kalvon naarmuuntumiskestävyys. Testi on käytännössä helppo tehdä, mutta tulokset voivat vaihdella käytettyjen välineiden ja testaus tapojen mukaan. Vertailukelpoisia tuloksia saadaan vain jos käytetään standardisoitua testiä, välineitä sekä testausmenetelmää. (6, linkit Resources -> Tek Tik White Paper -> Tek Tip - Pencil Hardness Test.)

PEHA-testin mittaluku ilmoitetaan arvoalueella pehmeimmästä 6B, kovimpaan 9H arvoon kuvan 4 skaalan mukaan. Yleensä muovikalvojen kuten polyesterin ja polykarbonaatin kovuus arvot vaihtelevat B ja 4H välillä riippuen onko substraatti pinnoitettu tai ei. Kovuus arvo ilmoitetaan kovimman lyijykynän mukaan, mikä ei naarmuta tai vahingoita pinnoitteen pintaa. (6, linkit Resources -> Tek Tik White Paper -> Tek Tip - Pencil Hardness Test.)

KUVA 4. PEHA-testissä käytetty kovuusasteikka (6, linkit Resources -> Tek Tik White Paper -> Tek Tip - Pencil Hardness Test)

Testi voidaan toteuttaa kuvan 5 mukaisella Elcometer 501 -testausvälineellä. Kyseistä testauslaitetta käytettiin myös työn aikana valmistettujen pinnoitteiden kovuuden selvittämiseksi. Elcometer 501 on ISO 15184 -standardin mukainen mittaustyökalu, joka painaa 2,1 kg ja siihen asetettu lyijykynä pysyy koko ajan 45 ° kulmassa, jolloin testattavaa pinnoitteeseen kohdistuu 7,5 N:n voima. Testauslaitteen mukana on myös 14 erikovuista lyijykynää, terän teroittimet, asettelulaatta sekä lyijyn tasoittamista varten hiomapaperia. (7, linkit Physical Test Equipment -> Hardness & Scratch -> Elcometer 501 Pencil Hardness Tester.)

KUVA 5. Elcometer 501 pinnoitteen kovuuden mittauslaite (7, linkit Physical Test Equipment -> Hardness & Scratch -> Elcometer 501 Pencil Hardness Tester)

2.2 Painettavuuteen vaikuttavat nesteen ominaisuudet

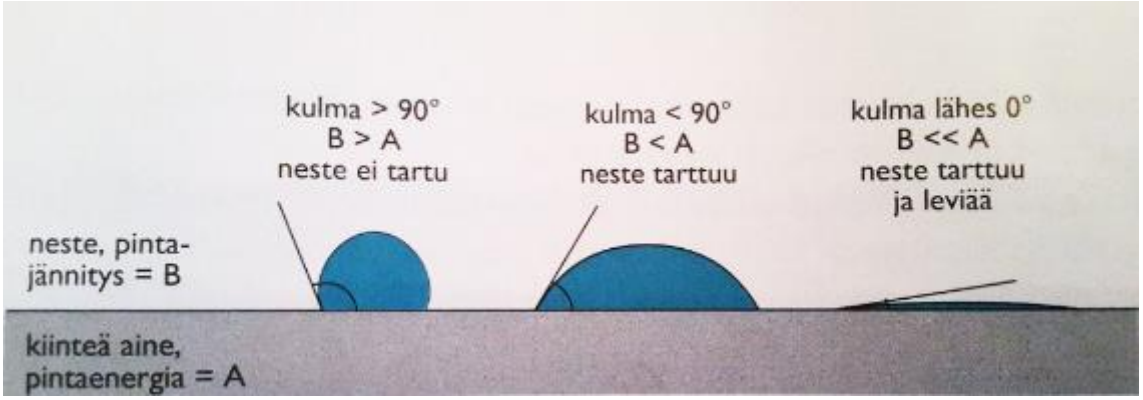
Painomenetelmien testauksessa oleellinen reologinen ominaisuus on viskositeetti eli nesteen sisäinen kitka. Viskositeetti voidaan jakaa vakio viskositeettiin eli newtonilaiseen virtaukseen sekä muuttuvaan viskositeettiin eli nesteen virtaus voi muuttua leikkausvoiman alaisena. (8, s. 135.)

Vaikka viskositeettia käytetään kuvaamaan nesteen ominaisuuksia, painoprosessissa nesteen reologian määrittäminen antaa paljon kokonaisvaltaisemman kuvan painettavan materiaalin käyttäytymisestä. Reologia käsitteenä tarkoittaa aineiden muodonmuutoksen ja virtauksen tutkimista. Se vaikuttaa materiaalin prosessoitavuuteen, painetun ja prosessoidun kalvon paksuuteen ja yhteneväisyyteen sekä jossain määrin materiaalin lopullisiin ominaisuuksiin. Oikeiden nesteen reologisten ominaisuuksien valintaan vaikuttavat käytetty painoprosessi, painotyökalut, ympäristön olosuhteet, prosessinopeudet ja joukko muita muuttujia. (2, s. 174 - 175.)

2.3 Painettavan pinnan kastuminen

Materiaalin pintakemialliset ominaisuudet ovat oleellinen osa työtä, kuten pintajännitys sekä sen suhde kiinteän materiaalin pintaenergiaan. Pintajännityksen ja pintaenergian suhteella on

merkitystä materiaalin siirtymiseen esimerkiksi painotelalta substraattiin sekä painojäljen leviämiseen substraatilla. Pintajännityksen ollessa suurempi kuin pintaenergia, neste ei tartu eikä leviä pintaan vaan jää pisaramuotoon kuvan 6 vasemmanpuoleisen pisaran mukaisesti. Kun pintaenergia on huomattavasti isompi kuin pintajännitys, neste leviää ja tarttuu pintaan. (8, s. 135.)



KUVA 6. Pintajännityksen vaikutus nesteen leviämiseen (8, s. 136)

Teflon-paistinpannun tarttumattomuus on hyvä esimerkki, jossa nesteen pintajännityksen ja teflonin pintaenergian suhdetta on käytetty hyväksi. Vesipisara puhtaalla teflon paistinpannulla jää pisaran muotoon eikä tartu pintaan, ja jos samankokoisen vesipisaran pudottaa puhtaalle metalli pinnalle, vesipisara leviää ohueksi kerrokseksi metallin pinnalle. Nämä kaksi tapausta kuvaavat kokeellisesti huomionarvoista eroa nesteen käyttäytymiseen matalan ja korkean pintaenergian omaavilla pinnoilla. (2, s. 176.)

Kiinteän aineen pinnanrajan sekä nesteenrajan kontaktikulman mittaamisesta on hyötyä materiaalin sekä substraatin painettavuuden ymmärtämiseksi. Painamiseen liittyvien ominaisuuksien lisäksi valmiin pinnoitteen ominaisuudet ovat tärkeitä pinnoitteen funktion kannalta. (2, s. 178.)

2.4 Painettavassa elektroniikassa käytettävä substraatti

Oikean substraatin eli painoalustan valintaan vaikuttaa monet tekijät kuten mekaaniset, fysikaaliset, nestemäiset sekä lämpöominaisuudet, saatavuus ja hinta. Ominaisuudet sekä parametrit kuten paksuus, jäykkyys, tasaisuus, kutistuma, läpikuultavuus, sähkönjohtavuus ovat myös tärkeitä valinta kriteerejä. Mahdollisia käytettäviä substraatteja on monia kuten muovit, paperi, tekstiilit, lasi sekä metallit. (9, s. 36.)

Useimmissa tapauksissa painettavassa elektroniikassa substraatin tulee olla edullinen sekä taipuisa, joten muovikalvot kuten PET ja PEN ovat yleisin käytettyjä. Silloin kun vaaditaan parempaa lämmönkestoa ja kemiallista kestävyyttä käytetään kalliimpia muoveja kuten polyamidi, PES ja PEEK. Kuvassa 7 on esitetty yleisimmät substraatti materiaalit sekä niiden suositukset. (9, s. 36.)

Substrate Material	Recommendation /Notes
PET	**Recommended for general use** Notes • Recommended as PET heat stabilised, Adhesion treated on one side • Typical Thickness 125 _m (available in many thicknesses) • Max use T 150 °C • e.g. Melinex® ST504
ITO-PET	**Recommended for active components (OPV, OLED, EC etc) patterning with etching** Notes • e.g. OC™50 ST504 (50 Ohm/□, transmission 85 %)
PEN	**Can be used, especially when better heat stability needed** Notes • e.g. Teonex® Q51 • Teonex® Q65 when high surface quality needed for thin film printing
PC	**Can be used** Notes • e.g. LEXAN™ 8010

Substrate Material	Recommendation /Notes
Acrylic/ PMMA	**Recommended for hot-embossing** Notes • Good optical properties • Thickness depending on depth of features 125/175/375/500 _m • e.g. Plexiglas® 99524
COC	**Can be used for hot-embossing** Notes • Thickness depending on depth of features • e.g. Tekniplex® COC 240
PI	**Can be used when standard soldering needed** Notes • Expensive
Paper	**Can be used for special applications** Notes • Absorbs moisture • Good printability • Emerging, commercial materials now available
Flex glass	**Recommended for sheet encapsulation** Notes • Commercially available in various types and thicknesses of between 25 and 100 µm.

KUVA 7. Tyypillisesti käytetyt substraatti materiaalit (9, s. 37)

3 SUBSTRAATIN ESIKÄSITTELY

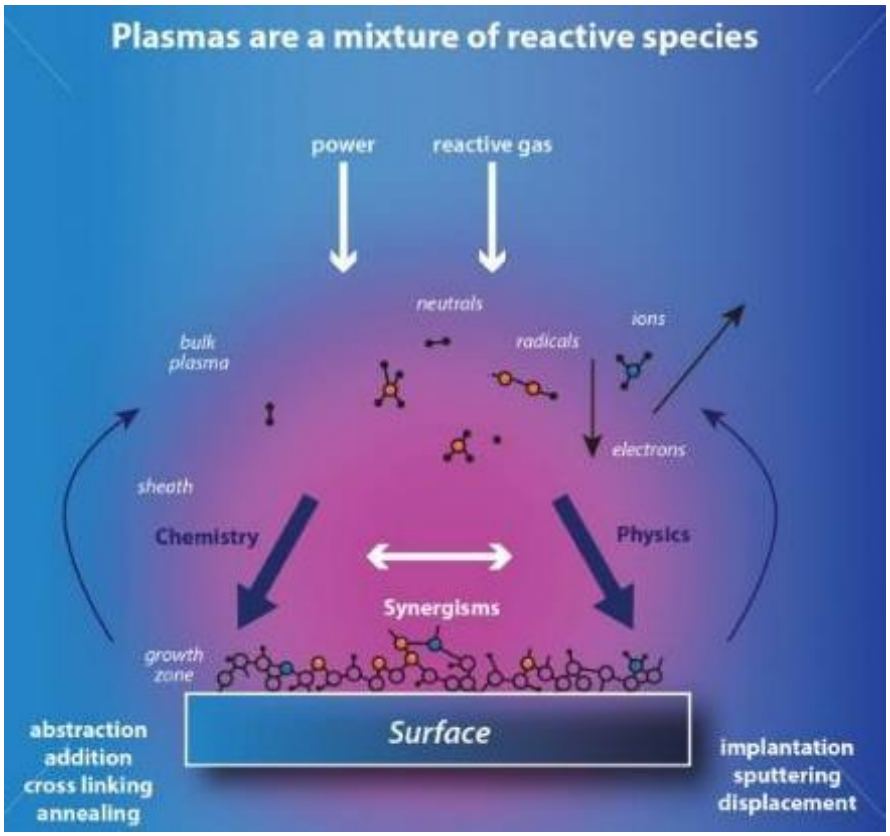
Rullalta rullalle -prosessissa substraatti voidaan esikäsitellä käyttäen plasmaa tai koronaa, näiden kahden käyttötarkoitus on sama, mutta toimintatavat erilaiset. Esikäsittelyn tarkoitus on puhdistaa substraatti mahdollisimman puhtaaksi ennen pinnoitusta sekä muuttaa substraatin pintaa siten, että materiaalin levittyminen ja vettyminen olisivat mahdollisimman hyvät. Työn aikana käytettiin plasmakäsittelyä rullalta rullalle -prosessissa sekä plasmakäsittelyn merkitystä substraatin kastumiseen tutkittiin laboratorio olosuhteissa.

Erilaisilla esikäsittelyillä voidaan nostaa polymeerien matalaa pintaenergiaa sekä parantaa adheesiota. Pinnan aktiivisuustasoa nostamalla tai karheutta lisäämällä, erilaiset pinnan esikäsittelyt parantavat adheesiota (10, s. 7). Adheesiomekanismit voivat perustua diffuusioon, kontaktiadheesioon ja mekaaniseen sekä sähköstaattiseen adheesioon, mutta lopullinen tartunta muodostuu usein monen eri adheesiomekanismin summana (10, s. 4).

Passiivisilla polymeereillä, joiden pinnalla ei ole reagoivia funktionaalisia ryhmiä, adheesion tarvittavat reaktiot eivät tapahdu itsestään. Kiinteän polymeerin pintaa karhentamalla kemiallisesti etsaamalla, mekaanisesti hiomalla tai plasmakäsittelyillä voidaan kasvattaa pinnan pinta-alaa. Tämä lisää pinnalla reagoivien kemiallisten ryhmien määrää reaktiopinta-alaa kasvattamalla. (10, s. 7 - 8.)

3.1 Plasmakäsittely

Plasmakäsittelyä käytetään muuttamaan erilaisten materiaalien pinnan ominaisuuksia materiaalien sitoutumisen, liimauksen ja pinnoituksen helpottamiseksi. Se puhdistaa sekä aktivoi pintaa, jolloin adheesio-ominaisuudet paranevat. Plasma sisältää positiivisia ioneita, elektroneja, neutraaleja kaasu atomeja tai molekyylejä, UV-valoa sekä virittyneitä kaasu atomeja ja molekyylejä, jotka voivat sisältää suuren määrän sisäistä energiaa. Kaikki nämä komponentit voivat vuorovaikuttaa materiaalin pintaan plasmakäsittelyn aikana (kuva 8). Plasmakäsittelyn vaikutus voidaan tarkalleen määritellä tarkoitukseen sopivaksi valitsemalla oikea kaasu seos, teho sekä paine. (11, linkit Plasma Technology -> Plasma Surface Technology -> Plasma Technology Overview -> Plasma Treatment Explained in Simple Terms.)



KUVA 8. Plasma käsittelyn toimintaperiaate (11, linkit Plasma Technology -> Plasma Surface Technology -> Plasma Technology Overview -> Plasma Treatment Explained in Simple Terms)

Plasmakäsittelyä voidaan käyttää moneen eri pinnan ominaisuuksiin vaikuttaviin tarkoituksiin kuten pinnan puhdistukseen, johon yleisesti käytetään happiplasmausta. Happiplasmaus poistaa orgaanisen lian substraatin pinnalta vakuumi UV-energian eli VUV-energian avulla. VUV-energia aiheuttaa kemiallisen reaktion pinnan lian kanssa aiheuttaen sen haihtumisen ja poistumisen plasmakammiosta. Plasma puhdistusta voidaan käyttää erilaisiin applikaatioihin kuten piirilevyjen puhdistukseen sekä orgaanisen lian poistamiseen lasi arkeilta ja paneeleilta. (12, linkit business -> plasma systems and contact angle analysis equipment -> Plasma Systems -> Plasma Applications.)

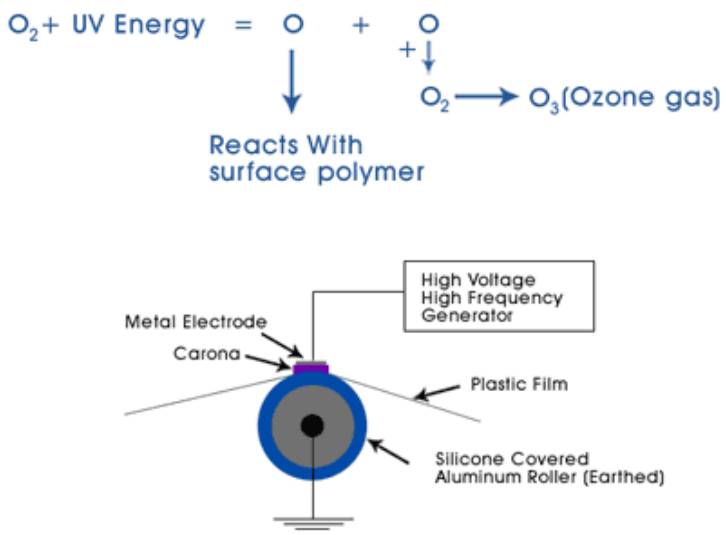
Plasmaa voidaan käyttää myös adheesion parantamiseen. Hyvä adheesio vaatii voimakkaita pinnanvälisiä voimia kemiallisen yhteen sopivuuden ja kemiallisten sidosten avulla. Plasmakäsittely voi auttaa luomalla kemiallisesti aktiivisia funktionaalisia ryhmiä kuten amiini-, karbonyyli-, hydroksyyli- ja karboksyyliryhmiä parantaen näin adheesiota. Plasmakäsittelyä voidaan käyttää myös kontrolloimaan substraatin pintaenergiaa. Hydrofiilisiä ja hydrofobisia pintoja voidaan luoda polymeeriin plasma kaasujen vuorovaikutuksessa. Hapen käyttäminen

hydroksyyli funktionaalisuuden luomiseen kasvattaa pinnan kostuvuutta eli parantaa nesteen leviämistä pinnalle. (12, linkit business -> plasma systems and contact angle analysis equipment -> Plasma Systems -> Plasma Applications.)

Useat eri parametrit vaikuttavat suuresti plasman fysikaalisiin ominaisuuksiin ja siten myös pinnan kemiaan plasmakäsittelyn aikana. Prosessointi parametreihin kuten kaasun tyyppiin, käsittelyn tehoon ja aikaan sekä käyttöpaineeseen voi käyttäjä vaikuttaa, mutta itse systeemin parametrit kuten elektrodin sijainti, reaktorin malli, kaasun sisääntulo ja vakuumi on asetettu plasmalaitteen mukaan. Plasmakäsittelyn muita etuja ovat vähäiset ympäristön vaikutukset, silmille haittaamattomuus toisin kuin laser- ja UV-säteilyssä sekä pisteetön (pinhole-free) pinnoite. Lisäksi vaikkakin kaasu plasmaa käytetään yleisesti sarjatuotannossa, myös jatkuva käsittely kalvoille on mahdollista. (12, linkit business -> plasma systems and contact angle analysis equipment -> Plasma Systems -> Plasma Applications.)

3.2 Koronakäsittely

Käsittelemättömän muovikalvon pintaenergia ei ole riittävä hyvään adheesioon painettavan materiaalin ja substraatin välillä (13, linkki Technical Information). Koronakäsittely kasvattaa substraatin pintaenergiaa hapettamalla muovin pinnan korkean jännitteen alaisena (2, s. 295 - 296). Menetelmä on laajasti käytetty muovikalvojen pintaenergiaa nostattava menetelmä. Koronakäsittely muovikalvolle tapahtuu siirtämällä se koronaan, joka syntyy elektrodin ja dielektrisen maadoitetun rullaimen välistä, kuten kuvassa 9 nähdään. Kalvon liikkuessa koronan lävitse sen pinnan molekyylit hapettuvat, jolloin kalvon pintaenergia kasvaa (13, linkki Technical Information).



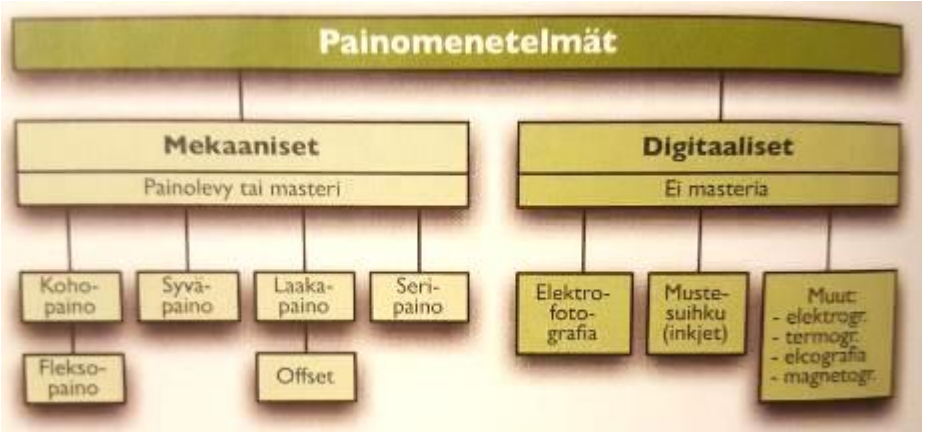
KUVA 9. Koronakäsittelyn toimintaperiaate (13, linkki Technical Information)

Korona siis aiheuttaa happimolekyylien hajoamisen atomimuotoon, jolloin happi atomit voivat yhdistyä käsitellyn pinnan molekyylien päihin. Tämä tarkoittaa että materiaalista tulee kemiallisesti aktiivinen. Koronakäsittelyssä on kuitenkin muistettava, että sen vaikutus heikkenee ajan myötä. Tästä syystä pinnoitus on tehtävä heti käsittelyn jälkeen. (14, linkit Knowledgebase / FAQ -> Basics of corona treatment.)

Koronakäsittelyn vaikutuksen heikkenemiseen vaikuttavat varastointi olosuhteet sekä käsiteltävä materiaali. Laitteen hinta sekä materiaalin pinnan käsittelyssä käytetty teho vaikuttavat suuresti prosessiin riippuen tarvittavasta käsittely nopeudesta, leveydestä sekä sivujen määrästä materiaalissa, jotka pitää käsitellä. Koronakäsittelyä käytetään yleensä kun käytetty substraatti on polypropeeni, vinyyli, polyeteeni, metallisoidut pinnat, paperi, polyvinyylikloridi, Polyetyleenitereftalaatti tai jokin muu vastaava materiaali. (14, linkit Knowledgebase / FAQ -> Basics of corona treatment.)

4 PAINOMENETELMÄT

Painomenetelmät ovat tekniikoita, joilla painoaihe esimerkiksi teksti tai kuva siirretään painoalustalle kuten paperille tai muoville. Tavanomaiset painomenetelmät perustuvat masteriin eli painolevyyn, -sylinteriin tai -kaavioon, jonka kautta painoaihe siirretään puristuksen avulla alustalle ja monistetaan täsmälleen samanlaisena. Digipainomenetelmät toimivat taas ilman puristusta ja masteria, jolloin jokaista painotapahtumaa varten painoaihe muodostetaan digitaalisesta aineistosta erikseen. Tämä mahdollistaa vaihtuvan tiedon painamisen, jolloin peräkkäiset tuotteet voivat olla erilaisia. Kuva 10 esittää painomenetelmien jaottelua. (8, s. 46.)

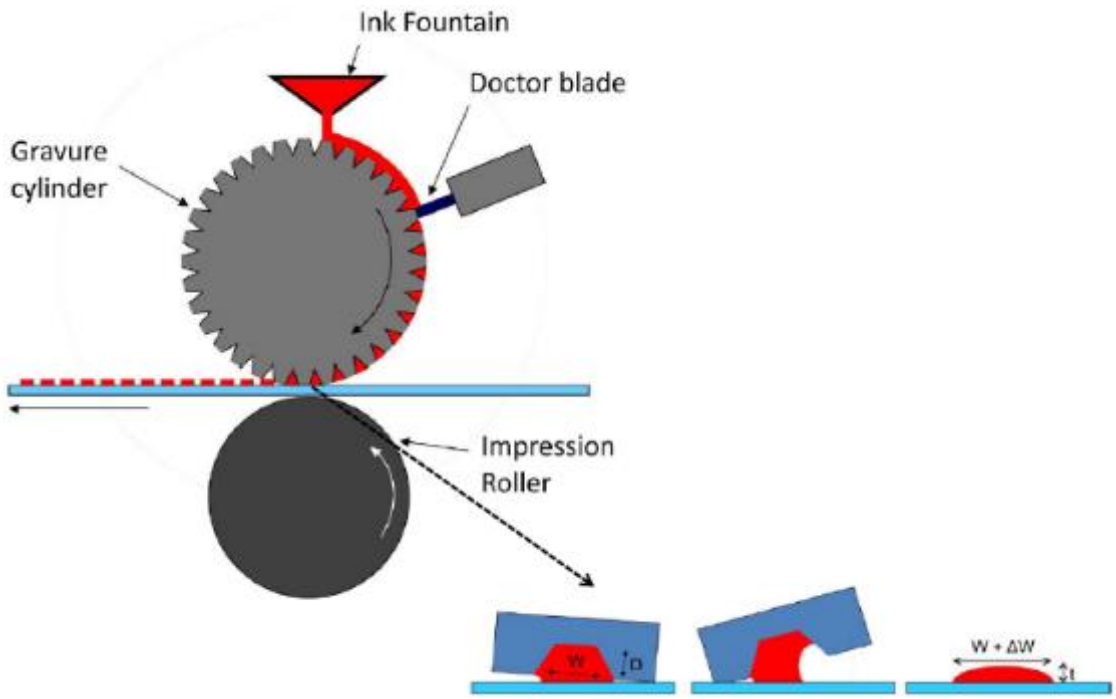


KUVA 10. Painomenetelmien luokitus mekaanisiin ja digitaalisiin menetelmiin (8, s. 46)

Erilaisissa painomenetelmissä käytetään erilaisia teknisiä ratkaisuja. Merkittäviä tekijöitä ovat masterin rakenne sekä värinsiirto ja siihen liittyvät painovärin koostumus, asettuminen ja kuivuminen. Painoalustan muoto, eli onko alusta arkki- vai rullamuotoista määrää painokoneen rakenteen. Painamisen jälkeisissä prosessivaiheissa kuten kuivaimissa, radan käsittelyssä ja jälkikäsittelytoiminnoissa on myös eroja. (8, s. 46.)

4.1 Syväpaino

Tavallinen syväpainoprosessi koostuu kaiverretusta metallisesta painopinnasta, terävästä terästä jota kutsutaan pyyhkijäteräksi (doctor blade) sekä kumilla päällystetystä vastatelasta (kuva 11). Kaiverrettu painopinta kastellaan musteella jonka jälkeen pyyhkijäterä pyyhkii musteen sylinterin pinnalta jättäen musteen kaiverrettuun kuvioon. Muste siirtyy tämän jälkeen substraatille vastatelan paineen avulla. (2, s. 274.)



KUVA 11. Syväpainomenetelmän toimintaperiaate (15, s. 32)

Syväpainossa syväpainosylinteri (gravure cylinder) muodostuu teräsvaipasta, joka päällystetään kuparilla. Kupari pinta on noin 2 - 3 mm paksu. Kupari pinnoituksen jälkeen se tasapainotetaan, kuvioidaan ja kiillotetaan. Kiillotuksen jälkeen sylinteri pinnoitetaan ohuella noin 5 - 8 µm kromikerroksella musteen siirtymisen ja kulutuskestävyyden parantamiseksi. (15, s. 34.)

Syväpainomenetelmässä painojälkeen vaikuttavat tekijät ovat

- materiaalin viskositeetti ja pintajännitys
- painonopeus
- nippipaine
- kuvion rasterikuoppien geometria
- resoluutio (lines / cm)
- painosylinterin materiaali ja pinnoitus
- pyyhkijäterän geometria ja paine
- substraatin epätasaisuus, huokoisuus ja puristettavuus. (15, s. 39.)

Syväpainomateriaalien viskositeetti on hyvin matala noin 25 - 200 mPa*s. Suurilla pyörimisnopeuksilla materiaalien täytyy pystyä virtaamaan sisään ja pois kuopasta. Suuria yhtenäisiä kuvioita muodostettaessa kuvion kuoppien välinen seinä jätetään hyvin ohueksi, jolloin materiaali leviää alustalla muodostaen yhtenäisen alueen. Materiaalikerrokset, jotka muodostuvat

syväpainossa ovat yleensä sadoista nanometreistä muutamiin mikrometreihin. Painomateriaalista vain noin puolet siirtyy painopinnalta alustalle, tämä johtuu muun muassa pintaenergiasta ja pinnan vuorovaikutuksesta, kuopan muodosta ja karkeudesta sekä materiaalin reologiasta. (15, s. 39.)

Syväpainomenetelmän etuja ovat seuraavat:

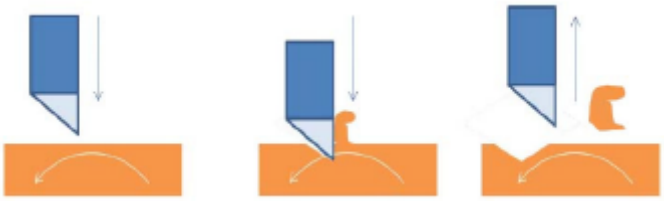
- Syväpainomenetelmällä pystytään painamaan sekä muoville että paperille.
- Menetelmä on edullinen silloin, kun painosmäärät ovat suuret.
- Prosessia on helppo hallita ja materiaalin siirto on yksinkertainen. (8, s. 73.)

Syväpainomenetelmän haittoja ovat seuraavat:

- Syväpainomenetelmällä on korkeat aloituskustannukset, eli sylinterinvalmistus kustannukset.
- Materiaalin siirto onnistuu vain sileäpintaisille materiaaleille. (8, s. 73.)

4.1.1 Syväpainosylinteri

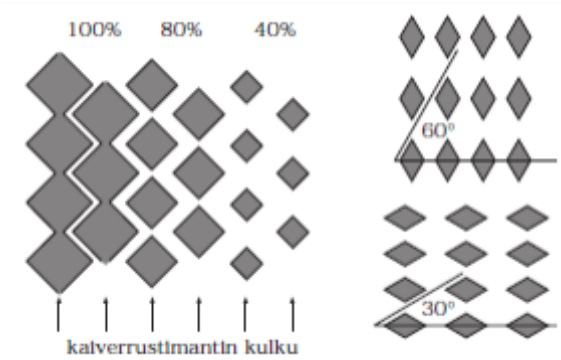
Syväpainosylinterin valmistusmenetelmistä kaiverrus (kuva 12) on yleisin. Kaiverrus tapahtuu kaiverrustimantilla, joka liikkuu noin 4 000 - 8 000 kertaa sekunnissa kohtisuoraan sylinterin pintaa vastaan kaiverrettavan sylinterin pyöriessä kaiverruskoneessa. Rasterikuopan syvyyden määrää kaiverrustimantin liikkeen pituus sekä kuopanmuoto ja pinta-ala määräytyvät kaiverrustimantin liikkeen ja sylinterin pyörimisnopeuden mukaan. (8, s. 65 - 66.)



KUVA 12. Syväpainosylinterin valmistus kaiverrusmenetelmällä (15, s. 35)

Yleisimmin rasterikuoppien muoto on katkaistu pyramidi. Rasterikuopat valmistetaan kaivertamalla ja kuopat ovat aina peräkkäin sylinterin kehän suuntaisesti. Rasterirakennetta litistämällä tai venyttämällä saadaan aikaan erilaisia rasterikulmia (kuva 13) (8, s. 65 - 66). Rasterikuoppien muotoon vaikuttaa myös käytetyn kaiverrustimantin geometria. Kaiverrustimantin

geometrian määrittää yleensä stylus kulma, joka kuvaa kärjen terävyyden. Yleisesti alhaisempi stylus kulma tarkoittaa terävämpää timantin kärkeä, jolloin kaiverretusta rasterinkuopista tulee syvempiä (16, s. 11).

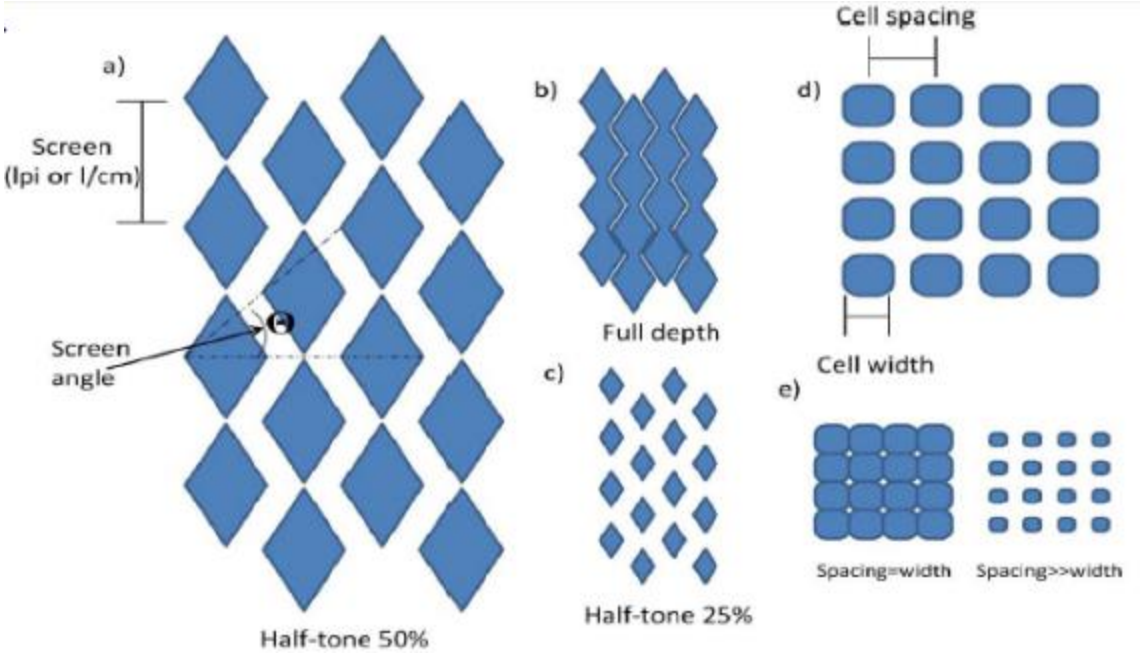


KUVA 13. Kaiverretun syväpainosylinterin kuvioinnin rakenne ja rasterikulman määritys (17, s. 9)

Syväpainosylinterin valmistuksessa syövytystekniikka on vähitellen poistumassa käytöstä. Syövytystekniikan tekninen etu on suurempi rasterikupin tilavuus kaiverrukseen verrattuna. Syövytysmenetelmässä valoherkällä polymeerillä päällystetty sylinteri valotetaan UV-valolla positiivifilmin läpi. UV-valotuksessa valoherkän ei-painavat pinnat kovettuvat, minkä jälkeen valottumaton osa kalvoa pestään pois. Tällöin paljastuu painavan pinnan kohdalta kuparipinta. (8, s. 66.)

Syväpainosylinterin valmistuksessa laserkaiverruksen käyttöä on tutkittu pitkään. Laserkaiverruksessa nopeudet ovat suuria, jopa 30 000 rasterikuppia sekunnissa. Laserkaiverruksessa erilaisia rasterikuppirakenteita voidaan kaivertaa lasersäteen kokoa ja tehoa säätämällä. Muodoiltaan laserkaiverretut rasterikupit ovat usein pyöreitä, jolloin materiaalin siirto on niistä tehokkaampaa kuin syövytetyissä tai kaiverretuissa rasterikupeista. (8, s. 67.)

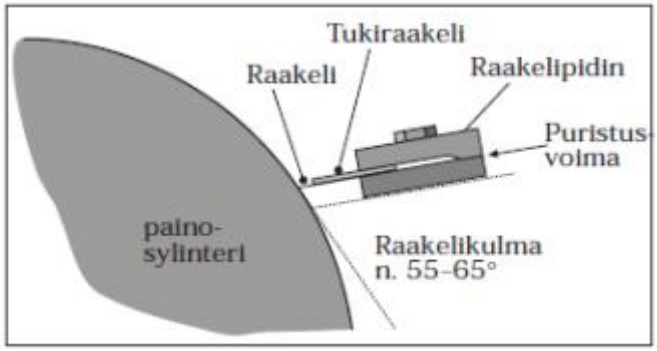
Valmistetut kuviot (rasterit) muodostuvat yksittäisistä kuopista, joiden muotoa, syvyyttä (cell depth, µm), seinämän paksuutta (wall width, µm) ja resoluutiota (mesh, lines / cm, tyypillisesti 40 - 140 l / cm) voidaan vapaasti muuttaa (kuva 14). Rasterikuppien tilavuus (cell volume, μm^3) ja määrä / mittayksikkö (cell volume per area, cm^3/m^2) määrittelevät alustalle siirrettävän musteen määrän. (15, s. 36.)



KUVA 14. Erityyppisiä rasterikuppien mittoja (15, s. 36)

4.1.2 Raakelointi

Raakeliterä tai pyyhkijäterä pyyhkii ylimääräisen materiaalin painosylinteristä, jonka avulla saadaan yhtenäinen materiaalin paksuus. Terän tyyppi, teränpidike, terän kontaktikulma sekä sen paine ovat muuttujia joita säädetään raakelointiprosessin aikana (kuva 15) (2, s. 283). Painamisen aikana raakeliterä kuluu, jolloin liiallista terän kulumista pyritään vähentämään puristusta säätämällä sellaiseksi, että sylinterin ja terän väliin jää ohut-, voiteleva painomateriaalikerros (8, s. 67).



KUVA 15. Raakelin rakenne (17, s. 13)

Painomateriaalin epäpuhtaudet voivat vioittaa pyyhkijäterää tai kohottaa sen joltain kohdalta irti sylinterin pinnasta, tämä näkyy painojäljessä viiruna. Näiden viirujen syntyä voidaan estää oskilloinnilla eli pyyhkijäterän sivuttaissuuntaisella liikkeellä. (8, s. 67.)

Pyyhkijäterät valmistetaan yleisimmin hiiliteräksestä, mutta muitakin materiaali vaihtoehtoja on kuten ruostumaton teräs sekä erilaiset muovit. Hiiliteräksestä valmistetut terät on todettu toimivan paremmin kuin esimerkiksi ruostumattomat terät. Ruostumattomasta teräksestä valmistetut terät ovat kestävämpiä vesipohjaisten materiaaleja käytettäessä, mutta ne eivät kulu yhtä tasaisesti kuin hiiliteräs terät. Muovista valmistetut terät eivät pyyhi yhtä hyvin kuin hiiliteräs terät. Muoviset terät myös kuluvat nopeammin. (2, s. 284.)

4.1.3 Painojälkeen vaikuttavia tekijöitä

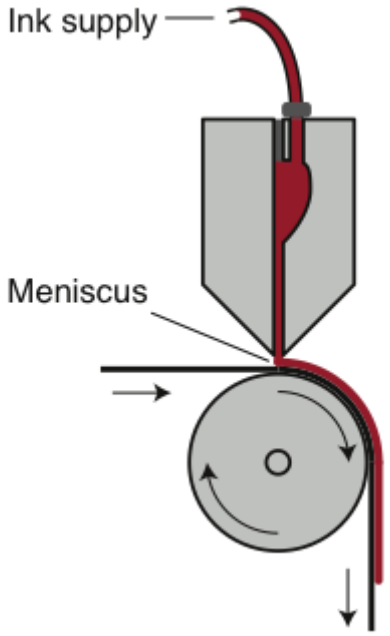
Syväpainomenetelmä yhdistetään yleensä hyvään ja tasaiseen painojälkeen koko painoprosessin läpi. Painojäljen laatuun voi vaikuttaa kuitenkin monia tekijöitä kuten substraatti, painosylinteri, painokuvion laatu, pyyhintä sekä materiaalin viskositeetti. (2, s. 295.)

Syväpainossa substraattina voidaan käyttää monia eri materiaaleja ja näiden materiaalien tärkein ominaisuus on niiden sileys. Käytettävän substraatin ollessa liian karhea on mahdollista, että osa pienemmistä painokuopista eivät ole kontaktissa substraattiin ja painojälkeen voi syntyä ns. pisteitä (skipped dots) eli tyhjiä kohtia, joihin painomateriaali ei ole siirtynyt. Muovisubstraattia käytettäessä muovi pinnan liian pieni pintaenergia voi tuottaa ongelmia painoprosessissa. Yleisin tapa välttyä alhaisen pintaenergian aiheuttamilta vettymisongelmilta on käyttää koronakäsittelyä ennen painoa. (2, s. 295 - 296.)

Oikeat painokuvion parametrit kuten oikea linjojen (lines / cm) määrä sekä kuvioiden geometriset parametrit vaikuttavat painonlaatuun. Väärien painokuvion parametrien käyttö voi aiheuttaa liiallisen tai liian vähäisen materiaalin siirron, jolloin painojälkeen syntyy poikkeamia. Yleensä painosylinterien valmistaja voi auttaa oikeiden painokuvion parametrien valinnassa. Oikean painokuvion valinnassa voidaan myös käyttää testitelaa, johon on kaiverrettu erilaisia kuvioita yhteen telaan. (2, s. 297.)

4.2 Slot-die-pinnoitus

Slot-die (rakosuulaake) -pinnoitus on kontaktiton prosessimenetelmä, jolla saadaan tasainen ja yhtenäinen märkäkalvo suurilla alueilla. Sillä voidaan pinnoittaa materiaaleja laajalla viskositeetti skaalalla, alle 1 mPa*s muutamiin tuhansiin mPa*s asti ja samalla pinnoitus nopeus voi olla välillä 1 - 600 m / min. Pinnoitusmenetelmän toimintaperiaate esitetään kuvassa 16. Märän kalvon paksuutta säädellään virtausnopeudella, pinnoitus leveydellä sekä nopeudella. (18, s. 14.)

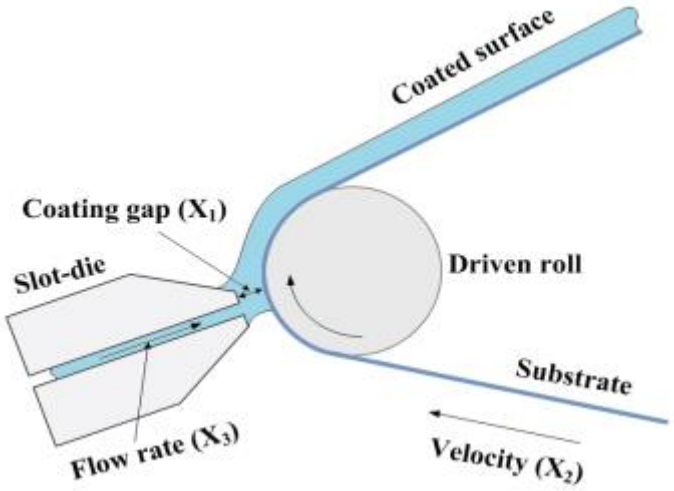


KUVA 16. Slot-die-pinnoitusmenetelmän toimintaperiaate (18, s. 15)

Slot-die-pinnoitus suutin on esitetty kuvassa 17 ja se valmistetaan tyypillisesti ruostumattomasta teräksestä ja sisältää materiaalin jakokammion, suuttimen raon sekä ylä- ja alavirtaus nokan. Sisäinen maski määrää materiaali syöttö raon leveyden ja mahdollistaa raitojen pinnoittamisen. Maskin paksuus riippuu materiaalin viskositeetista ja se on yleisesti 25 - 50 µm paksu matalan viskositeetin (< 20 mPa*s) materiaaleilla. Slot-die-pinnoituksen käyttökohteita ovat täyskerros ja yksiulotteisten raitojen pinnoitukset. Slot-die-pinnoitus toimii tiettyjen parametrien alueilla, jotka voidaan laskea teoreettisesti tai arvioida kokeilemalla. (18, s. 14 - 15.)

KUVA 17. Slot-die-pinnoitus suuttimen osat (19, linkit Knowledge sharing -> Learning center -> Fabrication -> Coating techniques -> Slot die coating)

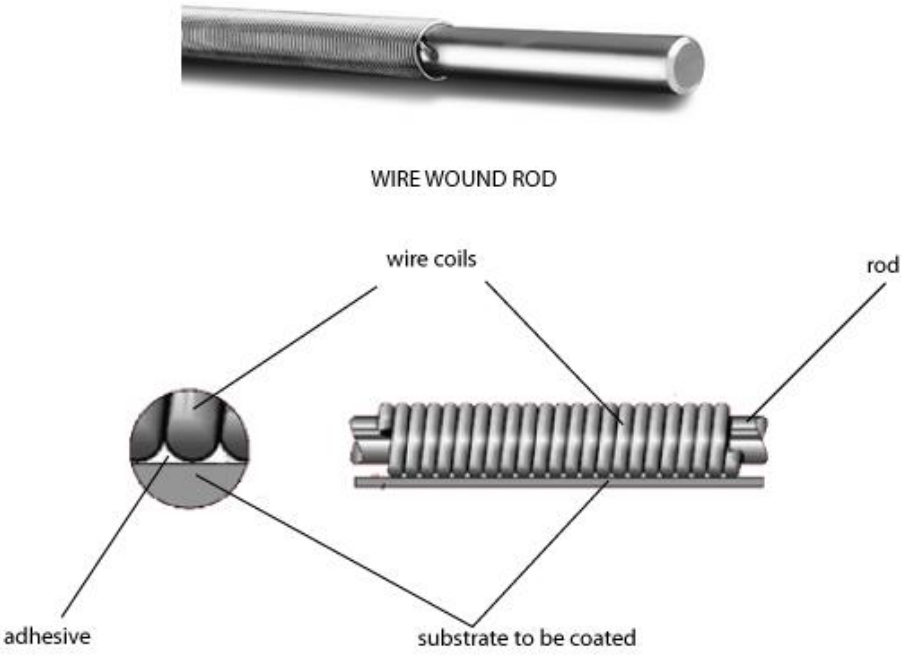
Slot-die-pinnoitus prosessissa suurimmat osatekijät koostuvat kemiallisista ja mekaanisista muuttujista. Kemialliset muuttujat, kuten nesteen viskositeetti, pintajännitys ja kiintoainepitoisuus voidaan pitää vakioina jos käytetään vain yhtä pinnoitusmateriaalia. Ainoastaan mekaanisia osatekijöitä pidetään suurimpina muuttujina slot-die-prosessissa. Kuvassa 18 on esitetty slot-die-pinnoitusprosessi sekä kolme muuttujaa, jotka vaikuttavat pinnoituksen paksuuteen. Pinnoitus paksuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat X_1 eli slot-die kärjen sekä substraatin väli, joka ilmoitetaan mikrometreissä. X_2 on rata nopeus (m / min) sekä X_3 on materiaalin syöttönopeus, joka voidaan ilmoittaa materiaalin syöttöpumpun nopeuksina (rpm) tai tilavuusvirtana (cm^3 / min). (20, s. 694.)



KUVA 18. Slot-die-pinnoitus prosessiin vaikuttavat mekaaniset muuttujat (20, s. 694)

4.3 Mayer rod -pinnoitus

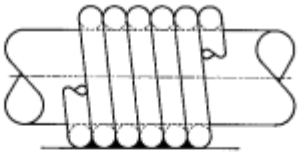
Mayer rod -pinnoitus (bar coating) on yksi suosituimmista pinnoitusmenetelmistä. Mayer rod on kuvan 19 näköinen ruostumattomasta teräksestä valmistettu sauva, johon on tiukasti kierretty ympärille ruostumatonta teräs lankaa vaihtelevin halkaisijoineen. Sauvaa käytetään ylimääräisen pinnoitusmateriaalin pyyhkimiseen. Pinnoitteen märkä paksuutta pyyhkimisen jälkeen kontrolloidaan sauvan langan halkaisijalla sekä sen paksuus on arviolta 0,1 kertaa langan halkaisija. (21, linkit Equipment -> Coating -> Coating unit.)



KUVA 19. Mayer rod -pinnoitus sauva (21, linkit Equipment -> Coating -> Coating unit)

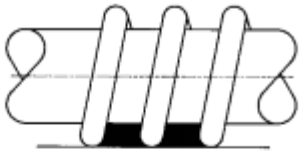
Mayer rod -pinnoitus on yksinkertainen pinnoitusmenetelmä, jolla saadaan aikaan tarkkoja sekä toistettavia pinnoitteita useimmille substraateille. Sauvan ympärille kiedottu lanka muodostaa tasaisen kuvion, jolle voidaan tarkasti määrittää pinnoitteen paksuus. Suljettu kierresauva mahdollistaa 4 - 120 µm:n paksuisen märkäkalvon pinnoituksen sekä paksumpiin kalvon paksuuksiin päästään spiraalimaisella kierteellä, jopa 500 µm:n saakka. (22, s. 3.)

Kuvassa 20 on RK Printin valmistamia suljettuja kierresauvoja sekä spiraalimaisia kierresauvoja sekä niiden pinnoituspaksuudet. Kuvan taulukosta nähdään että sauvan ympärillä olevan langan halkaisijan kasvaessa myös pinnoitettavan märkä kalvon paksuus kasvaa.



Close Wound

BAR No.	COLOUR CODE	WIRE DIAMETER		WET FILM DEPOSIT	
		INS	MM	INS	µm
0	White	0.002	0.05	0.00015	4
1	Yellow	0.003	0.08	0.00025	6
2	Red	0.006	0.15	0.0005	12
3	Green	0.012	0.31	0.0010	24
4	Black	0.020	0.51	0.0015	40
5	Horn	0.025	0.64	0.0020	50
6	Orange	0.030	0.76	0.0025	60
7	Brown	0.040	1.00	0.0030	80
8	Blue	0.050	1.27	0.0040	100
9	Tan	0.060	1.50	0.0050	120



Spirally Wound

BAR No.	WIRE DIAMETER		WET FILM DEPOSIT	
	INS	MM	INS	µm
150	0.010	0.25	0.006	150
200	0.014	0.36	0.008	200
300	0.020	0.51	0.012	300
400	0.030	0.76	0.016	400
500	0.040	1.00	0.020	500

KUVA 20. Suljettu sekä spiraalikierresauvat sekä niiden langan halkaisija ja pinnoituspaksuudet (22, s. 3)

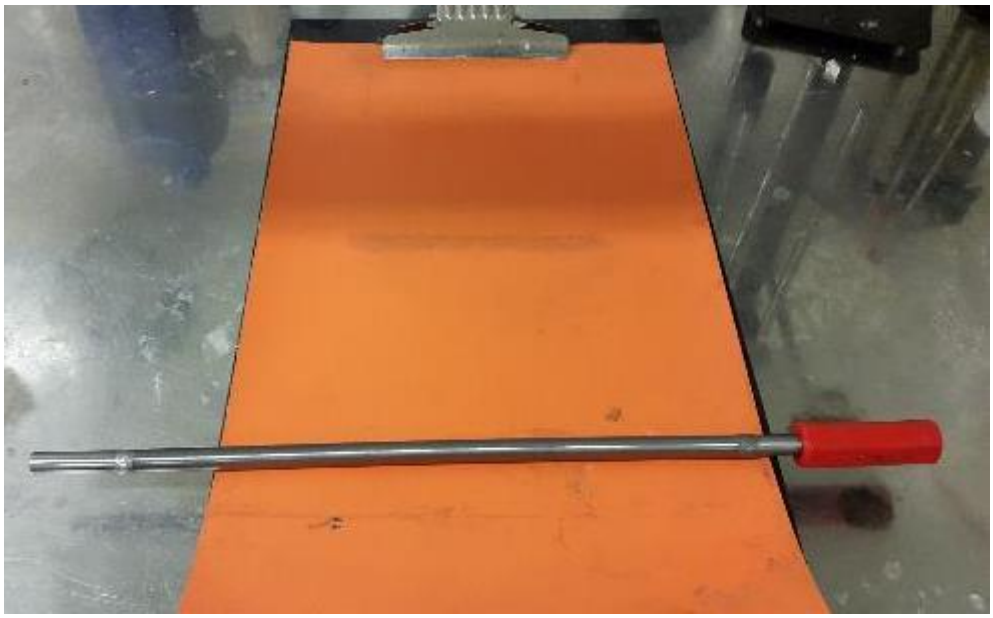
5 LABORATORIOYMPÄRISTÖ

Opinnäytetyö alkoi tutustumalla materiaaliin sekä sen tuotekehitykseen laboratoriossa, jossa valmistettu materiaali pystytään pinnoittamaan, prosessoimaan sekä testaamaan laboratorioympäristössä. Laboratorioympäristö on kehitetty vastaamaan mahdollisimman hyvin todellista rullalta rullalle -prosessia, jolloin materiaalin soveltuvuus rullalta rullalle -prosessiin voidaan todeta. Todellisuudessa laboratoriossa prosessointi tapahtuu kuitenkin arkkimuodossa, eivätkä kaikki prosessin vaiheet vastaa täysin rullalta rullan -prosessia. Nämä seikat tulevat esille työn edetessä kun siirrytään laboratorioympäristöstä tuotannontestauksiin.

Laboratoriossa pinnoittaminen tapahtuu manuaalisesti muovisubstraatille mayer rod -pinnoitusmenetelmällä. Pinnoittamisen jälkeen pinnoitettu muovi asetetaan spindle-koneen alustalle, jossa muovi pyörii 50 rpm nopeudella sekä siirtyy automatisoidusti esikuivaukseen sekä UV-valotukseen. Esikuivauksen sekä UV-valotuksen jälkeen muovi otetaan spindlen alustalta pois ja siirretään jälkikuivaus uuniin kovettumaan. Prosessoinnin jälkeen pinnoitteiden ominaisuudet testataan ja saadut tulokset analysoidaan.

5.1 Painomenetelmä

Materiaalin pinnoittaminen substraatille tapahtuu laboratorioympäristössä mayer rod -pinnoitusmenetelmällä (kuva 21). Pinnoitemateriaali levitetään noin 8 cm x 8 cm kokoisen substraatin yläosaan pipetillä, jonka jälkeen mayer rod -sauva asetellaan substraatin ylälaitaan ja vedetään tasaisella nopeudella ilman ylimääräistä painamista substraatin yli.



KUVA 21. Mayer rod -sauva ja alusta

Pinnoitus tapahtuu substraatille kahdella erikokoisella sauvalla, numero 2 sekä numero 3 sauvalla. Sauvalla numero 2 pinnoitetun märkäkalvonpaksuus kuvan 20 mukaan on 12 µm ja 3 sauvalla märkäkalvonpaksuus on 24 µm.

5.2 Esikuivaus

Esikuivauksen tarkoitus prosessissa on haihduttaa materiaalista liuottimia ennen UV-valotusta. Esikuivaus tapahtuu laboratorioympäristössä 1300 W infrapunalampulla noin 40 mm etäisyydellä substraatista. Useiden prosessitestauksien jälkeen on päädytty 60 sekunnin esilämmitys aikaan IR-lampulla. Esikuivaus voidaan toteuttaa myös eritavoilla kuten uunissa, mutta käytössä olevilla laitteistolla IR-lamppu on todettu helpoimmaksi tavaksi.

5.3 UV-valotus

Esikuivauksen jälkeen pinnoitettu substraatti siirtyy spindlessä UV-valaisimen alle, jossa materiaali altistetaan UV-A sekä UV-B aallon pituuksille 2 - 5s ajaksi. UV-valotusta käytetään materiaalin kovettamiseen.

5.4 Jälkikuivaus

Pinnoitteen jälkikuivaus, eli loppujen liuottimien haihdutus, tapahtuu 10 minuutissa vastusuunissa 120 °C:n lämpötilassa. Eri liuotinpohjia käytettäessä voidaan jälkikuivausaikaa sekä -lämpötilaa säätää, jolloin kaikki liuottimet saadaan haihdutettua materiaalista. Käytetty substraatti tosin alkaa muuttamaan muotoaan +130 °C:een lämmöissä, joten haihdutusajat eivät voi olla kovin suuret.

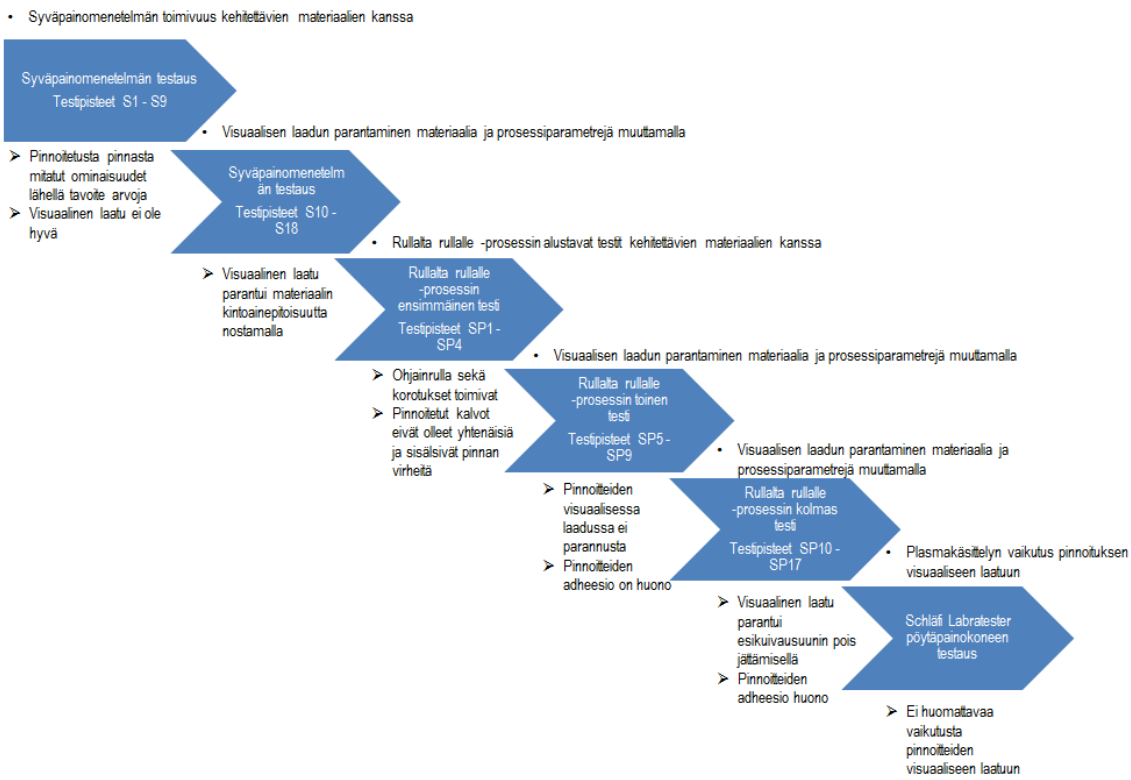
6 PAINETTAVAN PINNOITTEEN TESTAUS RULLALTA RULLALLE -PROSESSISSA

Kehitettävien materiaalien rullalta rullalle prosessiin sopivuuden testaus toteutettiin Oulun ammattikorkeakoulun PrinLabin SOM100-painokoneella sekä VTT:n MAXI-painokoneella. PrinLab on Oulun ammattikorkeakoulussa sijaitseva painettavan elektroniikan kehityslaboratorio. Laboratorion tarkoitus on tuoda esiin ja kehittää erilaisia painomenetelmiä ja applikaatioita. PrinLab on osa PrintoCent pilot factory -konseptia. (23.)

PrintoCent on VTT:n, Oulun yliopiston, Oulun ammattikorkeakoulun ja Oulu innovation Oy:n perustama optisen mittaustekniikan ja painettavan elektroniikan innovaatiokeskus, joka kehittää alan liiketoimintaa, tutkimusta ja koulutusta (24, linkit Medialle -> Uutiset -> PrintoCent-innovaatiokeskus: huippututkimustuloksista merkittävää liiketoimintaa). PrintoCent on vuonna 2009 perustettu VTT:n johtama yhteisö, jonka tavoitteena on luoda yritystoimintaa (25). PrintoCentin aktiviteettien päätavoitteena on luoda uusia komponentteja, tuotteita ja ratkaisuja painettavan elektroniikan teknologian avulla. PrintoCent tarjoaa suunnittelu-, kehittämis- ja valmistusympäristön, joka keskittyy rullalta rullalle- ja hybridivalmistuksen suunnitteluun ja kehittämiseen. (26, linkki About Us.)

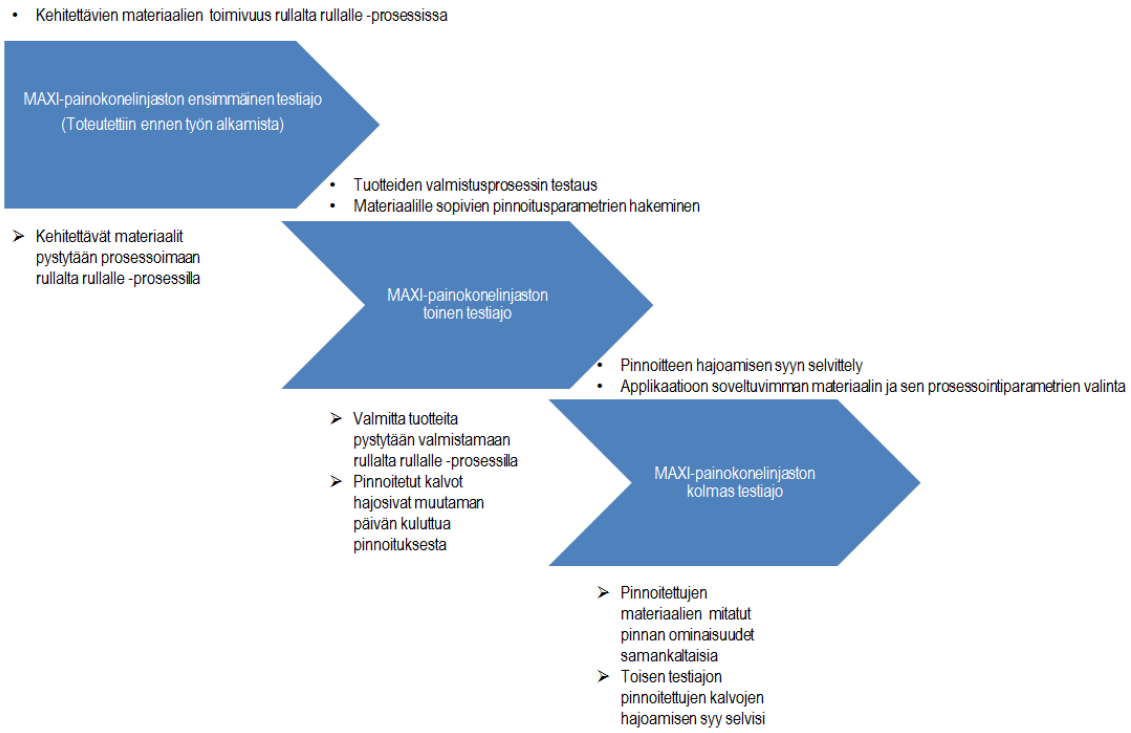
Rullalta rullalle -prosessissa (R2R) käytetään taipuisaa substraattia kuten paperia, pahvia ja muoveja. Applikaatioiden sekä prosessi vaatimusten perusteella työssä käytettäväksi substraatiksi on valittu DuPont Teijin Films toimittajan Melinex ST506 PET (polyetyleenitereftalaatti) 125 µm paksuinen muovikalvo, jonka tiedot löytyvät liitteestä 1. Melinex ST506 -substraatin ominaisuuksista prosessin kannalta merkittävimmät ovat alhainen kutistuma lämmön alaisena sekä korkeat optiset ominaisuudet eli valon transmissio arvo. (27.)

SOM100-painokoneella tehdyt testit toteutettiin kuvan 22 mukaisella testiajosuunnitelmalla. Suunnitelman mukaan ensiksi testattiin syväpainomenetelmän sopivuus kehitettävien materiaalin kanssa. Syväpainomenetelmän soveltuvuuden toteamisen jälkeen materiaaleja testattiin rullalta rullalle -prosessissa SOM100-painokoneella.



KUVA 22. SOM100-painokoneen testiajosuunnitelma, sen tavoitteet sekä tulokset

MAXI-painokonelinjastolla tehdyt testit toteutettiin kuvan 23 mukaisen testiajosuunnitelmalla. Ensimmäinen testiajo oli toteutettu ennen työn alkamista. Ensimmäisen testiajon pohjalta suunniteltiin toinen ajo, ja sen pohjalta kolmas testiajo.



KUVA 23. VTT:n MAXI-painokonelinjaston testiajosuunnitelma, sen tavoitteet ja tulokset

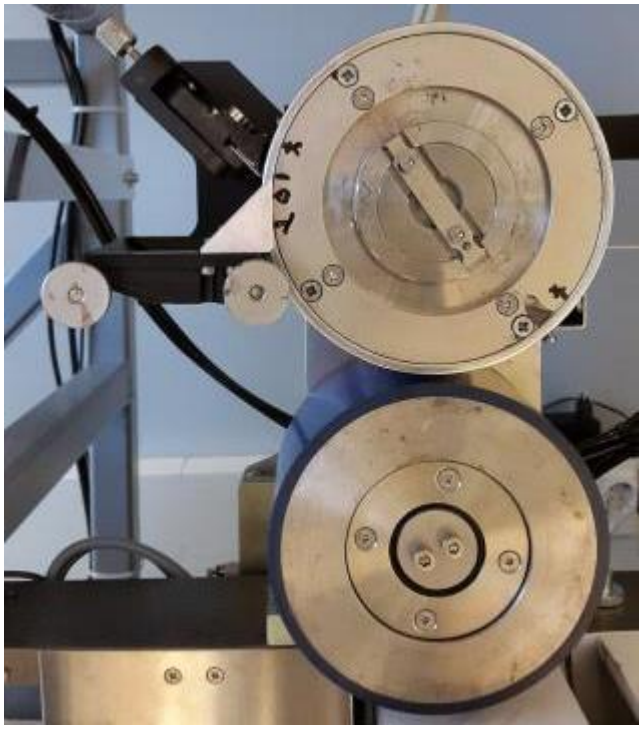
6.1 Rullalta rullalle -prosessin testaus laboratorioympäristössä

Pinnoitettavien materiaalien testaus suunniteltiin tehtäväksi Oulun ammattikorkeakoulun PrinLabin R2R SOM100-painokoneella. SOM100-painokone on kuvan 24 mukainen ja se sisältää flexopaino-, silkkipaino-, syväpaino- ja kuumapuristusyksikön sekä kuivausuunin ja IR-lampun. Käytännössä kaikki SOM100-painokokeen painomenetelmät soveltuvat materiaalin testaamiseen. Flexo- ja silkkipainomenetelmän testaamiseen pitäisi kuitenkin suunnitella ja hankkia painosylinterit testejä varten.

KUVA 24. SOM100-painokone (23, linkki -> Equipment)

Testiajot toteutetaan testipisteittäin. Yhdessä testipisteessä pinnoitettua kalvoa on vähintään 50 cm. Pinnoitettu kalvo leikataan kahteen tai kolmeen osaan jatkoprosessointia ja testauksia varten. SOM100-painokoneella tehdyt syväpainomenetelmän testauksen testipisteet merkitään tunnuksella S ja rullalta rullalle -prosessilla tehdyt testipisteet merkitään tunnuksella SP.

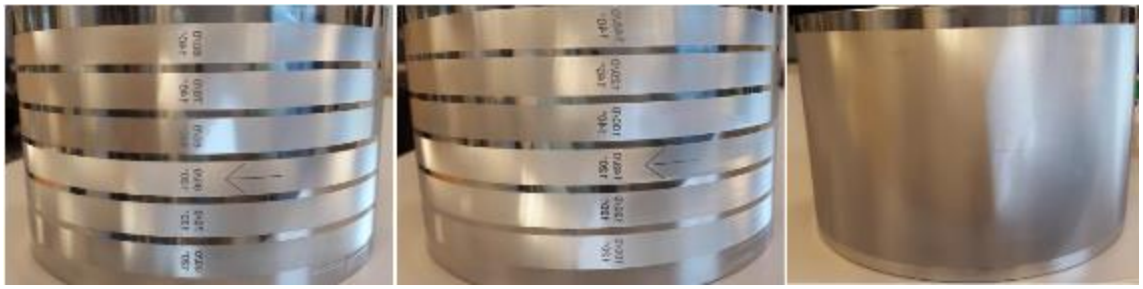
Testaus päätettiin toteuttaa syväpainoyksiköllä (kuva 25), koska se todettiin alkupalaverissa toteutuskelpoisemmaksi painomenetelmäksi materiaalien testaukseen. SOM100-painokoneen syväpainoyksikkö sisältää syväpainosylinterin, vastatelan sekä pyyhkijänteränpidikkeen ja ylimääräistä materiaalia keräävän kaukalon. Materiaalin syöttö syväpainosylinterille tapahtuu manuaalisesti syöttämällä sitä sylinterin päälle. Sylinteriä voidaan pyörittää sunday drive -tilassa, jolloin painosylinteri pyörii vapaasti eli se ei ole vastatelan kanssa kosketuksessa.



KUVA 25. SOM100-painokoneen syväpainoyksikkö

6.1.1 Syväpainomenetelmän testaus

Syväpainomenetelmä valittiin materiaalin testaukseen pinnoitettavan materiaalin yhteensopivuuden painomenetelmän kanssa sekä valmiiden testisylinterien, jolloin alustavat testit pystyttiin toteuttamaan ilman hankintakustannuksia. Syväpainomenetelmän testaus tapahtui jo olemassa olevilla kuvan 26 näköisillä syväpainosylintereillä.



KUVA 26. PTS02-, PTS03- ja PTS04-syväpainosylinterit

Syväpainosylinterien parametrit löytyvät taulukosta 1. Koko rullalta rullalle -prosessia ei tässä vaiheessa työtä pystytä vielä testaamaan puutteellisen jälkilämmityksen sekä UV-valaisimen takia. PTS02 sekä PTS03 sylintereistä ei ole olemassa tarkempia tietoja kuin niiden rasteri määrä

sekä kaiverrus eli styluskulma. PTS04 sylinteristä on kuitenkin valmistajan antamat tarkemmat tiedot eli

- resoluutio 100/0 lines / cm
- rasterikulma 37°
- stylus kulma 140°
- yhden kupin leveys 90 µm, syvyys 23 µm and seinämän paksuus 10 µm
- siirtotilavuus 6,3 cm^3 / m^2.

TAULUKKO 1. Syväpainosylinteristä PTS02 sekä PTS03 tiedetyt parametrit

PTS02		**PTS03**	
Resoluutio (lines / cm)	**Stylus kulma (°)**	**Resoluutio (lines / cm)**	**Stylus kulma (°)**
100	120	60	120
120	120	70	120
148	120	80	120
100	140	60	140
120	140	70	140
148	140	80	140

Painomenetelmä pystytään testaamaan tekemällä prosessi rullalta arkki -prosessina, eli substraattiin painetaan syväpainoyksikön avulla materiaalia. Tämän jälkeen rata pysäytetään ja substraatista leikataan noin 60 cm:n osa, joka on syväpainoyksikön ja vetotelan välinen matka. Substraatin leikkauksen jälkeen se vielä leikataan pienemmiksi paloiksi noin 15 - 20 cm:n pätkiksi, minkä jälkeen loppuprosessi tehdään arkkimuodossa. Pinnoitetut kalvot alkulämmitetään uunissa 120 °C 90:nen sekunnin ajan, jonka jälkeen arkit siirretään UVALOC-1000 UV-uuniin. Käytetyn UV-uunin lampun teho säädetään 500 W:iin sekä aika 2 sekuntiin. UV-valotuksen jälkeen arkit siirretään uuniin 10 minuutiksi 120 °C:n lämpöiseen uuniin.

Ennen syväpainomenetelmän testausta alkulämmitysaika sekä UV-uunin asetukset testattiin mayer rod -menetelmällä. Tuloksia verrattiin spindlellä tehtyihin kalvoihin ja todettiin prosessin tuottavan samoja ominaisuuksia pinnoitetulle kalvolle.

Syväpainomenetelmän testaus toteutettiin taulukon 2 mukaisesti. Testissä käytettiin kahta eri syväpainosylinteriä PTS03, jossa on kuusi eri painoraitaa eri parametreilla sekä PTS04, joka on pinnoitukseen tarkoitettu sylinteri. Testissä kokeiltiin myös kolmea eri materiaalivariaatiota sekä eri nopeuksia parhaan mahdollisen visuaalisen jäljen aikaansaamiseksi. Testimatriisi suunniteltiin PrinLabin aikaisempien syväpainotestien pohjalta, jolloin paine pidettiin vakiona ja radan nopeutta muuttamalla lähdettiin hakemaan hyvää painojälkeä.

TAULUKKO 2. Painomenetelmän toimivuuden ensimmäinen testimatriisi

Testipiste	**Testisylinteri**	**Materiaali**	**Radan nopeus (m / min)**	**Nippipaine (Bar)**	**Esikuivuas (s / °C)**	**UV-aika (W / s)**	**Jälkikuivuas (min / °C)**
S1	PTS03	#4	3	2,5	90 / 120	500 / 2	10 / 120
S2	PTS03	#4	6	2,5	90 / 120	500 / 2	10 / 120
S3	PTS03	#4	6	2,5	90 / 120	500 / 2	10 / 120
S4	PTS03	#3	9	2,5	90 / 120	500 / 2	10 / 120
S5	PTS03	#3	9	2,5	90 / 120	500 / 2	10 / 120
S6	PTS04	#3	6	2,5	90 / 120	500 / 2	10 / 120
S7	PTS04	#3	4	2,5	90 / 120	500 / 2	10 / 120
S8	PTS04	#3	9	2,5	90 / 120	500 / 2	10 / 120
S9	PTS04	#1	4	2,5	90 / 120	500 / 2	10 / 120

Ensimmäisten tulosten analysointien jälkeen päätettiin vielä testata uudelleen PTS04 ja PTS03 sylintereillä muutamia materiaaleja. Testipisteiden S10 - S18 (taulukko 3) tarkoituksena oli nähdä pystytäänkö syväpainomenetelmällä painamaan hyvin levittyvää ja yhtenäistä kalvoa vielä muuttamalla painoparametreja, kuten nopeutta ja painetta sekä nostamalla materiaalin kiintoaineprosenttia ja viskositeettiä.

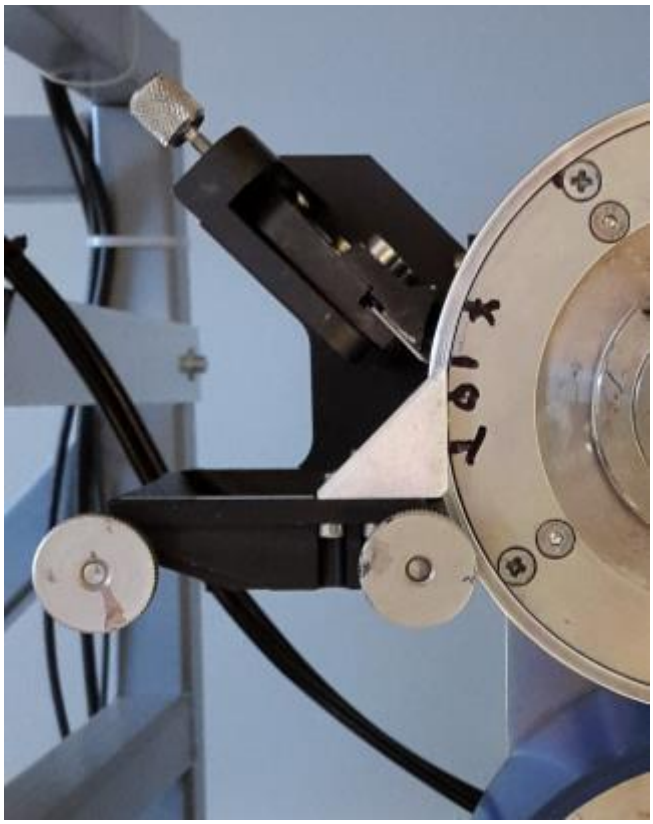
TAULUKKO 3. Painomenetelmän toimivuuden toinen testimatriisi

Testipiste	**Testisylinteri**	**Materiaali**	**Radan nopeus (m / min)**	**Nippipaine (Bar)**	**Esikuivuas (s / °C)**	**UV-aika (W / s)**	**Jälkikuivuas (min / °C)**
S10	PTS04	#3	9	2,5	90 / 120	500 / 2	10 / 120
S11	PTS04	#5	9	2,5	90 / 120	500 / 2	10 / 120
S12	PTS04	#6	9	2,5	90 / 120	500 / 2	10 / 120
S13	PTS04	#6	9	3,5	90 / 120	500 / 2	10 / 120
S14	PTS04	#1	9	2,5	90 / 120	500 / 2	10 / 120
S15	PTS04	#6	12	3,5	90 / 120	500 / 2	10 / 120
S16	PTS03	#3	9	3,5	90 / 120	500 / 2	10 / 120
S17	PTS03	#5	9	2,5	90 / 120	500 / 2	10 / 120
S18	PTS03	#6	9	3,5	90 / 120	500 / 2	10 / 120

Toisen testikerran aikana radan nopeus pidettiin edellisen ajon perusteella parhaaksi todetulla nopeudella eli 9 m / min sekä testattiin yhdellä materiaalilla myös 12 m / min radan nopeutta. Tässä ajossa muutettiin myös nippipainetta 2,5 baarin sekä 3,5 baarin välillä.

Molemmissa testeissä pyyhkijäteränä käytettiin teräksistä MDC-BLUESTAR-terää, joka aseteltiin kuvan 27 mukaan. Terän tiedot ovat seuraavat:

- materiaali hiiliteräs
- terän kärjen paksuus 60 µm
- terätyyppi viisto, kulma 3°
- viiston leveys 2,700 mm
- terän paksuus 0,15 mm.

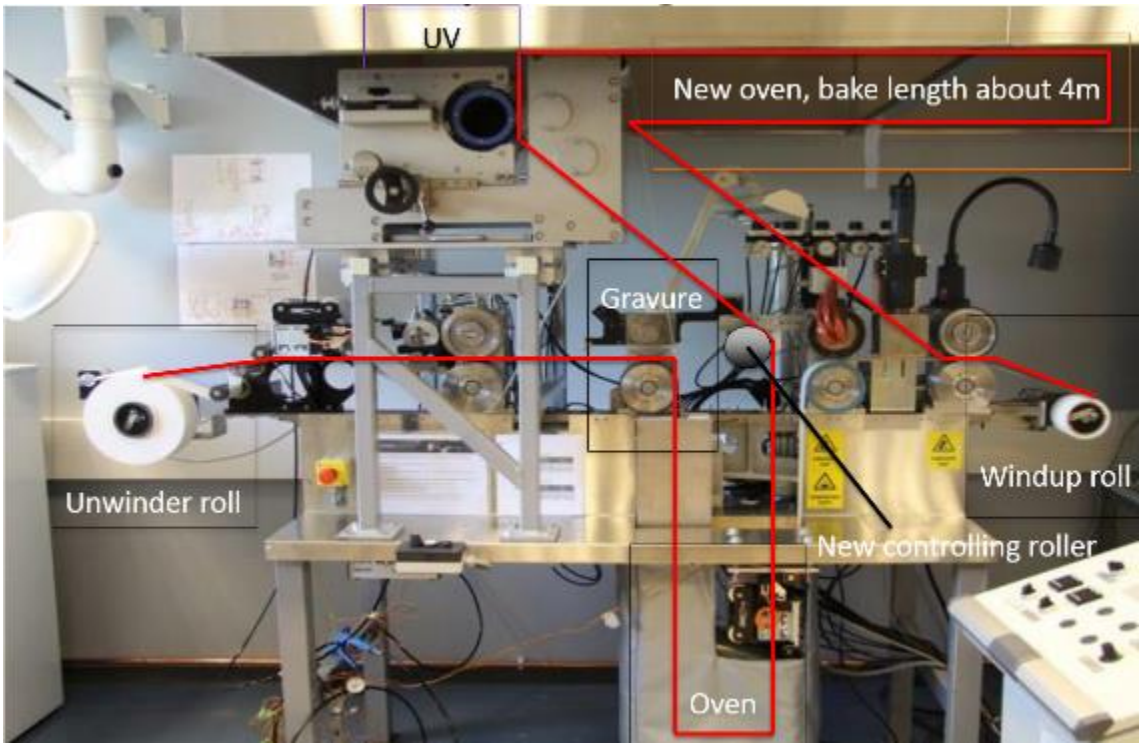


KUVA 27. Syväpainoyksikön pyyhkijänterä ja sen kaukalo

6.1.2 Koko prosessin testaus

Syväpainomenetelmän testauksien jälkeen voitiin todeta, että materiaali voi toimia syväpainomenetelmää käyttäen. Tulosten analysoinnin jälkeen aloitin koko rullalta rullalle -prosessin suunnittelun SOM100-painokoneella tehtäväksi. PrinLabin asennettua uuden noin 4-metrisen kuivausuunin SOM100-painokoneeseen näin, että materiaali voitaisiin testata rullalta rullalle -prosessissa vaikkakin tehokasta UV-valaisinta ei painokoneessa vielä ollutkaan. Suunnittelin radan kulkevan kuvan 28 mukaisesti, eli syväpainon jälkeen painettu kalvo siirtyisi

ensimmäiseen kuivausuuniin esikuivaukseen. Esikuivauksen jälkeen se nousisi ylös sekä kääntyisi ohjausrullan kautta silkkipainoyksikköön, jonka jälkeen se siirtyisi uuteen kuivausuuniin. Viimeisen kuivausuunin jälkeen rata kulkisi vetorullien kautta kiinnirullaukseen.

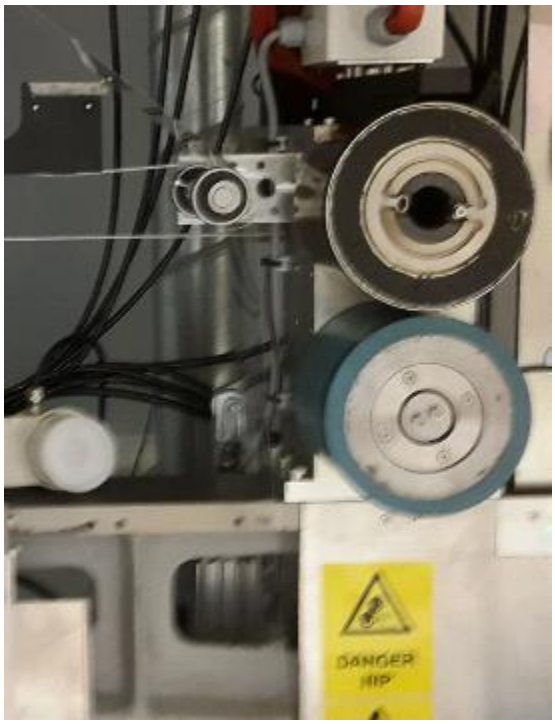


KUVA 28. Radan kulku rullalta rullalle -prosessissa

Ongelmaksi kyseisessä radassa tulivat telakontaktit alustan pinnoitetun puolen kanssa. Materiaali ei kuivu vielä tarpeeksi ensimmäisen kuivausuunin aikana ja kalvon pinta jää märäksi vielä uunin jälkeen. Ensimmäinen telakontakti alustan pinnoitus puolelle tulee jo ensimmäisessä kuivausuunissa sekä uunin radanohjaimella. Ratkaisin ongelman kohottamalla kuivausuunin teräsrullan reunoja käytetyllä PET-substraatilla sekä lämpöä kestävällä teipillä, jolloin alustan keskiosa noin 5 cm:n matkalta ei ota kontaktia telan kanssa vaan pysyy koskemattomana radanohjaimeen saakka. Radanohjaimeen asetettiin samankaltainen reunojen korotus kuin uunin telaankin kuvan 29 mukaisesti.

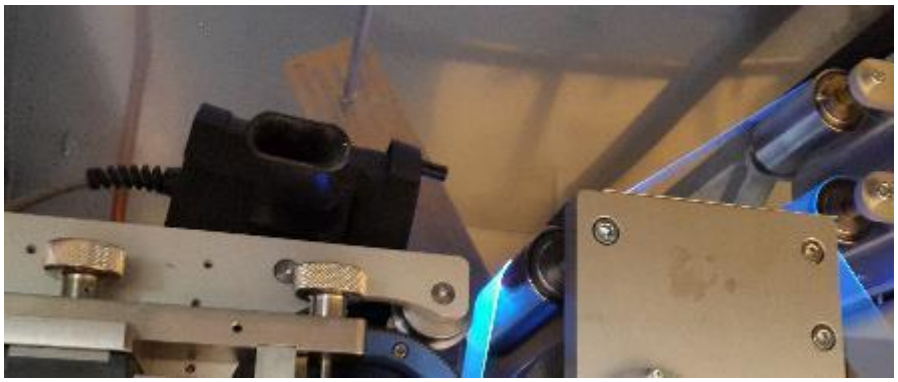
KUVA 29. Ensimmäisen kuivausuunin telan reunojen korotus

Uusi radan ohjainrulla valmistettiin ja asennettiin projektia varten kuvan 30 mukaiseksi. Radan ohjaimen kautta rata kulkee kahden noin 5 cm toisissaan erillään olevan laakerin päältä, jolloin alustan pinnoitetun puolen keskikohta ei ole kosketuksessa telaan.



KUVA 30. Uusi SOM100-painokoneen ohjainrulla

UV-valon lähteenä käytetiin Oulun ammattikorkeakoulun konelaboratoriosta löytyvää UV MidNight lamppua (kuva 31). Valaisin asetettiin SOM100-painokoneessa silkkipainoyksikön päälle ennen pidempää kuivausuunia.



KUVA 31. UV MidNight UV-valo silkkipainoyksikön päällä

SP1 - SP4 (taulukko 4) testien tarkoitus oli testata uuden ohjainrullan toimivuus sekä kuivausuunin korotuspintojen toimivuus. Tavoitteena oli myös saada tuntumaa rullalta rullalle -prosessin toimivuudesta käytetyillä laitteilla, muun muassa kehittyykö materiaali tarpeeksi käytetyillä kuivausuunien säädöillä ja UV-valaisimella. Radan nopeus pidettiin mahdollisimman alhaisena, jotta rataa ehdittiin tarpeeksi seuraamaan sekä painettua jälkeä tutkimaan ajon aikana. Radan nopeuden ideana oli myös saada pidettyä kuivaus ajat mahdollisimman pitkinä, jotta materiaali pystyisi mahdollisesti kehittymään loppuun asti.

TAULUKKO 4. Rullalta rullalle -prosessin ensimmäinen testimatriisi

Testipiste	**Materiaali**	**Testisylinteri**	**Radan nopeus (m / min)**	**Nippipaine (Bar)**	**Esikuivaus (°C)**	**UV (W - cm)**	**Jälkikuivaus (°C)**
SP1	#5	PTS04	3	3,5	130	35 - 8	140
SP2	#5	PTS04	3	2,5	140	35 - 8	150
SP3	#3	PTS04	3	2,5	150	35 - 8	150
SP4	#5	PTS03	3	2,5	120	35 - 8	150

6.1.3 Matalan viskositeetin materiaalin testaus

Alustavien rullalta rullalle -prosessi testausten jälkeen testattavien materiaalien liuottimia ja lisäaineita hieman muutettiin:

- viskositeetti 3 - 4 mPa * s
- hydrofobisuus – CA = 105°
- etanoli testi = läpäisee
- hyvä adheesio = 5b.

Materiaalit 7 - 9 testattiin laboratorioympäristössä hyvin tuloksin ja materiaalien viskositeetti saatiin laskettua noin 20 - 60 mPa*s:sta 3 - 4 mPa*s:een liuotin muutoksilla sekä kiintoainepitoisuutta laskemalla. Käytetyt liuottimet pyrittiin myös vaihtamaan alhaisemman kiehumispisteen omaaviin liuottimiin, jotta materiaalien loppuun kehittyminen rullalta rullalle -prosessissa olisi todennäköisempää.

Rullalta rullalle -prosessissa materiaaleja lähdettiin testaamaan taulukon 5 mukaisesti. Ensiksi matalilla radan nopeuksilla sekä erilaisilla nippipaineilla, kuivausuunien lämpötilat pyrittiin pitämään vakiona testien aikana ja testissä oli käytössä vain PTS03 syväpainosylinteri, jolla oli tähän mennessä saatu parhaita tuloksia. SP5 - SP17:n testit toteutettiin muovisella pyyhkijäterällä metallisen sijaan, jotta nähtäisiin saadaanko pinnoitetun kalvon visuaalista laatua parannettua erilaista pyyhkijänterää käyttämällä. Käytetty pyyhkijäterä oli Esterlam E10 Range, jonka terän tyyppi on lamelli, jossa on askel ja sen paksuus on 0,75 mm sekä leveys 16 mm.

TAULUKKO 5. Rullalta rullalle -prosessin toinen testimatriisi

Testipiste	Materiaali	Testisylinteri	Radan nopeus (m / min)	Nippipaine (Bar)	Esikuivaus (°C)	UV (W - cm)	Jälkikuivaus (°C)
SP5	#7	PTS03	3	3,5	120	35 - 8	140
SP6	#7	PTS03	5	2,5	110	35 - 8	140
SP7	#7	PTS03	5	3,5	110	35 - 8	140
SP8	#8	PTS03	5	1,5	110	35 - 8	140
SP9	#8	PTS03	3	2,5	120	35 - 8	140

SP5 - SP9:n testitulosten perusteella painojälki ei ole visuaaliselta laadultaan hyvä, eivätkä materiaalit ole kehittyneet loppuun saakka. Materiaaleja testattiin uudelleen taulukon 6 testimatriisin mukaan. Testin tarkoituksena oli parantaa kalvojen visuaalista laatua testaamalla samaa materiaalia eri radan nopeuksilla sekä kehittyminen pyrittiin saada loppuun nostamalla jälkikuivausuunin puhallustehoa 2. asetukselle. SP16 - SP17 testipisteissä kokeiltiin myös mitä tapahtuisi, jos materiaalin annettaisiin asettua kauemmin eli esikuivausuuni otettiin pois päältä, jolloin painettu materiaali asettumisaika kasvoi moninkertaisesti. Esikuivaus uunin pois jättämistä kompensoimaan jälkikuivaus uunit asetettiin maksimi asetuksille.

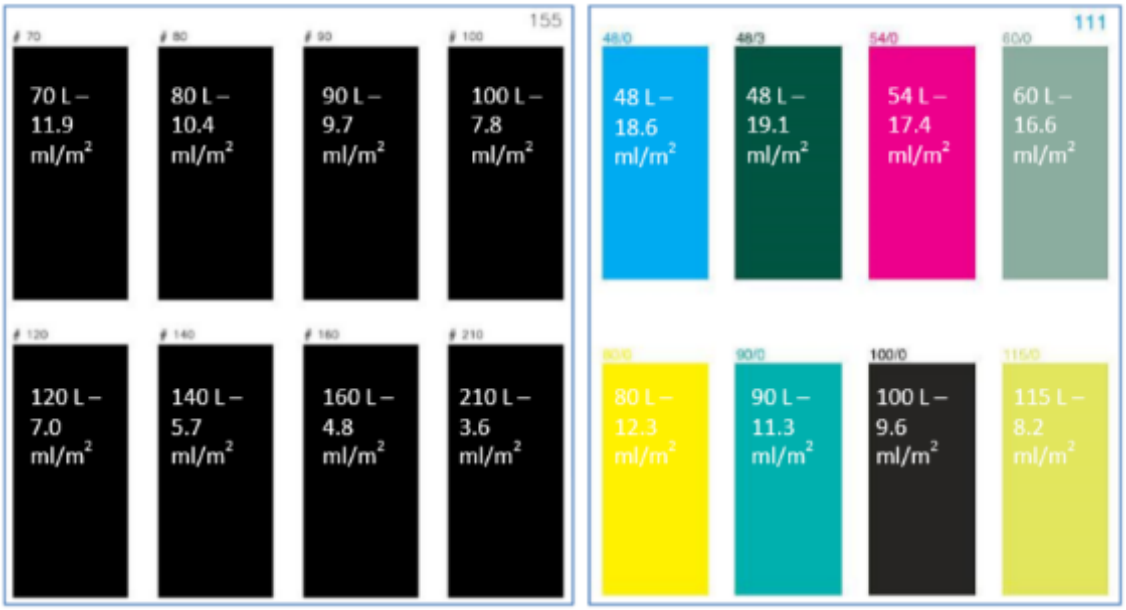
TAULUKKO 6. Rullalta rullalle -prosessin kolmas testimatriisi

Testipiste	**Materiaali**	**Testisylinteri**	**Radan nopeus (m / min)**	**Nippipaine (Bar)**	**Esikuivaus (°C / Puhallus teho)**	**UV (W - cm)**	**Jälkikuivaus (°C / Puhallus teho)**
SP10	#7	PTS03	3	2,5	120 / 1.	35 - 8	130 / 1.
SP11	#7	PTS03	6	2,5	110 / 1.	35 - 8	130 / 2.
SP12	#7	PTS03	9	2,5	110 / 1.	35 - 8	130 / 2.
SP13	#9	PTS03	3	2,5	110 / 1.	35 - 8	130 / 1.
SP14	#9	PTS03	6	2,5	120 / 1.	35 - 8	130 / 2.
SP15	#9	PTS03	3	2,5	120 / 1.	35 - 8	130 / 2.
SP16	#7	PTS03	3	2,5	-	35 - 8	150 / 2.
SP17	#9	PTS03	3	2,5	-	35 - 8	150 / 2.

Huonoa levittymistä sekä epätasaista kalvonlaatua päätettiin vielä testata VTT:n pöytämällin syväpainokoneella. VTT:n Schläfi Labratester -pöytäpainokoneella (kuva 32) pystyttiin testaamaan erilaisia painolaattojen parametreja sekä myös substraatin plasmauksen vaikutusta materiaalien levittymiseen.

KUVA 32. Schläfi Labratester -pöytäpainokone

Painettujen kalvojen prosessointi tapahtui arkkimuodossa samalla tavalla kuin syväpainomenetelmän testeissä SOM100-painokoneella. Eli plasmattu tai ei plasmattu substraatti asetettiin pöytämallin syväpainokoneeseen, jossa käytettiin kahta erilaista syväpainolaatta (kuva 33). Kummassakin laatassa oli kahdeksan erilaista kuvioita erilaisilla painoparametreilla. Painon jälkeen arkki siirrettiin uuniin 60 sekunniksi 120 asteessa, jonka jälkeen se siirrettiin UVALOC-1000 UV-uuniin. UV-valaisimen teho säädetään 500 W sekä aika 30 sekuntiin. UV-valotuksen jälkeen arkit siirretään vielä uuniin 120 °C 10 minuutiksi.



KUVA 33. Syväpainotestissä käytettyjen laattojen parametreja

6.2 Rullalta rullalle -prosessin testaus tuotantoympäristössä

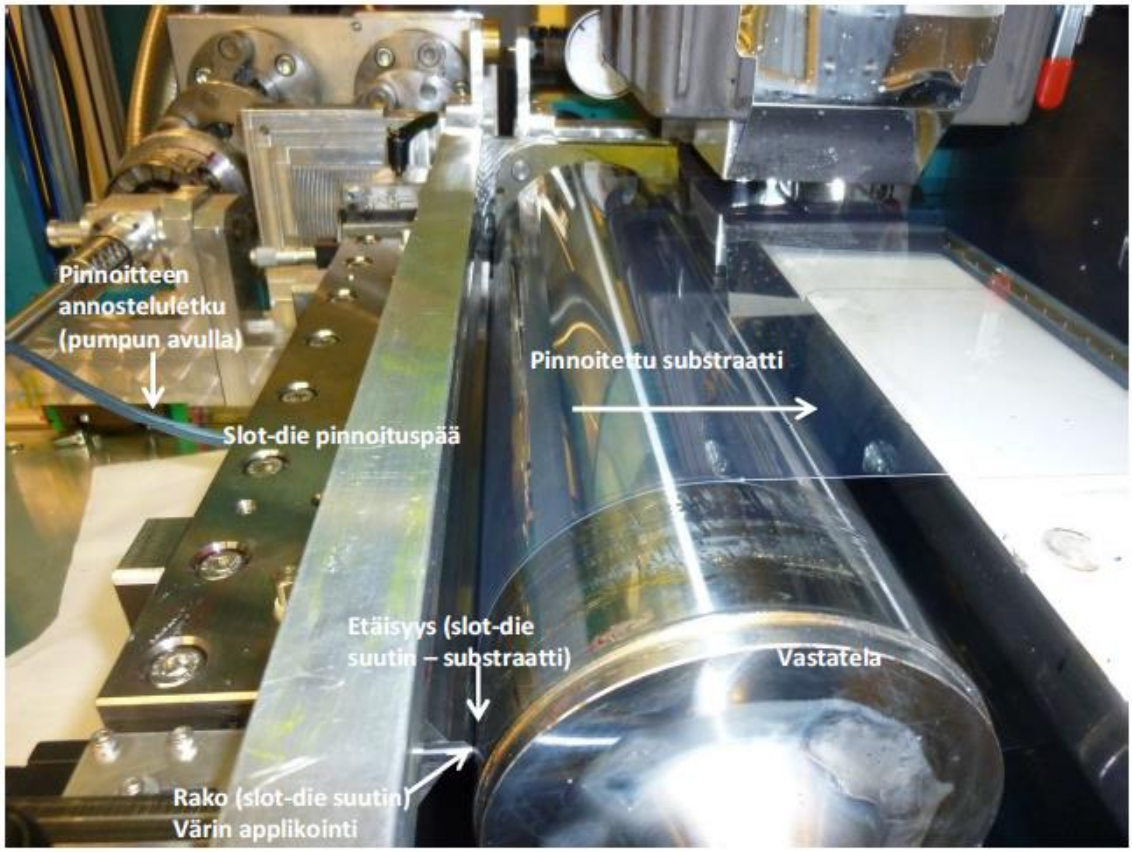
Kehitettävien materiaalien rullalta rullalle -prosessin testaus tuotantoympäristössä toteutettiin VTT:n MAXI-painokoneella, joka löytyy kuvasta 34. MAXI-painokone on kaksikerroksinen painolinjasto, jossa on neljä eri paikkaa painoyksiköille. Mahdollisia käytettäviä painomenetelmiä ovat syväpaino-, silkkipaino- ja kohokuviopainomenetelmä sekä slot-die-pinnoitusmenetelmä. MAXI sisältää myös plasmakäsittely-, kuumapuristus-, laminointi- sekä leikkausyksikön. Kuivaus yksiköinä MAXI-painokoneessa on kuivausuuni sekä UV-valo. Painokoneessa käytettävän substraatin maksimileveys on 300 mm sekä sen maksiminopeus on 30 m / min. (28.)

KUVA 34. VTT:n MAXI-painokonelinjasto (28)

MAXI-painokone on SOM100-painokoneeseen verrattuna huomattavasti suurempi ja monipuolisempi. SOM100-painokone on hyvin soveltuva prototyyppien valmistukseen ja materiaalien tutkimiseen rullalta rullalle -prosessissa. MAXI-painokone soveltuu suurempien sarjojen valmistukseen ja materiaalien tuotantomittakaavan testaamiseen. MAXI-painokoneella prosessi on automatisoidumpi kuin SOM100-painokoneessa sekä prosessilaitteet ovat yleisesti tuotantokäytössä.

MAXI-painokoneella toteutettiin kolme testiajoa, joista yksi ennen työn alkamista ja kaksi työn aikana. Kahdessa ensimmäisessä ajossa pinnoitusmenetelmänä käytettiin slot-die

-pinnoitusta sekä kolmannessa ajossa mayer rod -pinnoitusta. MAXI-painokonelinjaston slo-die -pinnoitusyksikkö on kuvan 35 mukainen ja se sisältää materiaalin syöttöpumpun, pinnoituspään sekä vastatelan. Työn aikana slot-die-pinnoitusmenetelmän muita parametreja ei muutettu kuin pumpun kierrosnopeuksia. Suuttimen etäisyys pidettiin vakiona 40 µm sekä suuttimen raon koko pidettiin 50 µm:ssä.

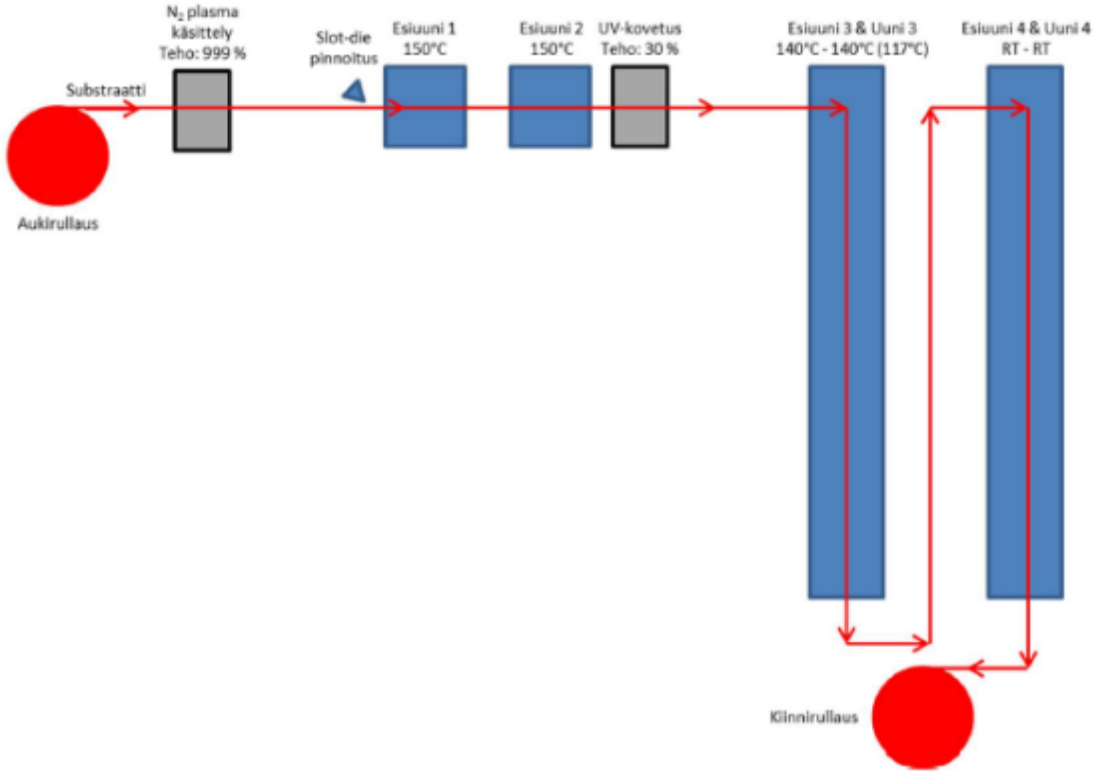


KUVA 35. MAXI-painokoneen slot-die-pinnoitusyksikkö

6.2.1 Ensimmäinen testiajo

Ennen opinnäytetyön alkua kehitettäviä materiaaleja oli kerran testattu jo MAXI-painokoneella. Testiajojen raportista sekä tuloksista sain hyvät alkutiedot rullalta rullalle -prosessista sekä materiaalien käyttäytymisestä kyseisessä tuotantoprosessissa. Testiajon aikana itse prosessi pidettiin vakiona testipisteiden välillä, eli kuivausuunien lämpötilat sekä puhallustehot pysyivät samoina sekä UV-valaisimen teho sekä radan nopeus pysyi samana, jolloin prosessointi ajat olivat vakiot testipisteiden välillä. Testiajojen tarkoituksena oli löytää prosessissa toimiva materiaali sekä liuotin yhdistelmä.

Ensimmäisen testiajojen prosessi oli kuvan 36 mukainen eli auki rullauksen jälkeen substraatti plasmakäsiteltiin radalla, jonka jälkeen substraatti siirtyi slot-die-pinnoitukseen. Pinnoituksen jälkeen substraatti siirtyy ensimmäiseen noin 60 cm levyiseen esikuivausuuniin. Esikuivausuuneja on kaksikappaletta peräkkäin. Esikuivausuunien jälkeen substraatti siirtyy UV-valaisimen alle, josta se siirtyi pidempään kuivausuuniin. Substraatti kulkee kahden pidemmän kuivausuunin kautta kiinnirullaukseen, mutta kyseisessä testiajossa jälkimmäinen kuivausuuni ei ollut toiminnassa.



KUVA 36. MAXI-painokoneen prosessikaavio

6.2.2 Toinen testiajo

Ensimmäisen testiajon perusteella lähdettiin suunnittelemaan ja toteuttamaan seuraavaa testiajoa MAXI-painokoneella. Testin tarkoituksena oli käydä koko tuotantoprosessi lävitse VTT:n laitteistolla. Eli MAXI-painokoneella toteutetaan pinnoitusprosessi slot-die-pinnoittamalla sekä valmiin kalvon laminointi. Demo -kappaleiden leikkuu toteutettiin jälkikäsittelylinjastolla, johon

suunniteltiin ja mallinnettiin SolidWorks 2015 ohjelmalla kalvosta leikattava iPhone 5 -muoto. Muodon mitat saatiin iPhone 5 -puhelimesta sekä kaupallisesta suojakalvosta mittaamalla. Mallinnettu muoto tallennettiin DWG muotoon ja lähetettiin VTT:n yhteyshenkilölle, jonka kautta die-cut -työkalu tilattiin heidän laitteeseen sopivaksi. Mallinnettu muoto mittoineen löytyy liitteestä 2.

Ajossa lähdettiin hakemaan yhdelle materiaalille sopivia prosessiparametreja muuttamalla pumpun nopeutta sekä ajonopeutta. Pumpun nopeutta sekä ajonopeutta muuttamalla vaikutetaan pinnoitteen paksuuteen, joka taas vaikuttaa pinnoitteen loppuominaisuuksiin. Pinnoitteen ominaisuuksia testattiin ajojen aikana pikaisella testillä aina koepisteiden välillä. Testi toteutettiin leikkaamalla valmiista pinnoitteesta palanen ja hinkkaamalla sitä teräsvillalla. Näin saatiin tuntuma pinnoitteen kestävyydestä.

Testiajot toteutettiin kuvien 37 ja 38 mukaisella testimatriisilla. Koepisteessä 9 käytettiin samoja ajoparametreja sekä materiaalin kiintoainepitoisuutta kuin edellisen ajon parhaassa koepisteessä. Tämä koepiste toimi ajojen referenssinä, johon parametrin muutoksia verrattiin. Seuraavassa koepisteessä vaihdettiin materiaali kiintoainepitoisuudeltaan suurempaan sekä yritettiin pumpun nopeutta säätämällä saada aikaan mahdollisimman paksu kalvo aikaan, jotta nähtäisiin pikatestillä miten se vaikuttaa pinnoitteen kestävyyteen. Pikatestissä TP10 pinnoite todettiin kestävämmäksi, mutta liian suuret pumpun nopeudet aiheuttivat ongelmia kun materiaalia alkoi valumaan alaspäin eli materiaalia siirtyi enemmän substraatille kuin se pystyi vastaanottamaan.

Koepiste	Pumpun nopeus (rpm)	Ajonopeus (m/min)	Pinnoite	Kommentit
TP9	1500	5	AN368 (30 m-%)	PGME/PGMEA-pohjaliuotin
TP10	2000	5	AN368 (50 m-%)	PGME-pohjaliuotin
TP11	1800	5	AN368 (50 m-%)	PGME-pohjaliuotin
TP12	1500 → 1200	2	AN368 (50 m-%)	PGME-pohjaliuotin
TP13	1000	3	AN368 (50 m-%)	PGME-pohjaliuotin
TP14	1000	3	AN371-50 (50 m-%)	PGME-pohjaliuotin (sama kuin AN368)
TP15	1000	3	AN371-50 (50 m-%)	PGME-pohjaliuotin (sama kuin AN368)
TP16	1000	3	AN362 (50 m-%)	MIBK-pohjaliuotin
TP17	1000	5	AN362 (50 m-%)	MIBK-pohjaliuotin
TP18	1000	4	AN362 (50 m-%)	MIBK-pohjaliuotin
TP19	1000	3	AN171 (50 m-%)	PGME-pohjaliuotin (sama kuin AN368)
TP20	1000	3	AN171 (50 m-%)	PGME-pohjaliuotin (sama kuin AN368)

KUVA 37. MAXI-painokoneen ajon testiparametreja

Koepiste	Esiuunit		UV	Pitkä uuni		Viimeinen uuni	
	T (°C)	Puhallus (%)	Teho (%)	T (°C)	Puhallus (%)	T (°C)	Puhallus (%)
TP9	150	30	30	140	30	RT	30
TP10	150	30	30	140	30	RT	30
TP11	150	30	30	140	30	RT	30
TP12	150	30	30 → 20	140	30	RT	30
TP13	150	30	20	140	30	RT	30
TP14	150	60	20	140	80 → 60	RT	80 → 30
TP15	150	40	20	140	40	RT	30
TP16	150	30	20	140	40 → 30	RT	30
TP17	150	30	20	140	30	RT	30
TP18	150	30	20	140	30	RT	30
TP19	130	40	20	140	40	RT	30
TP20	130	30	20	140	40	RT	30

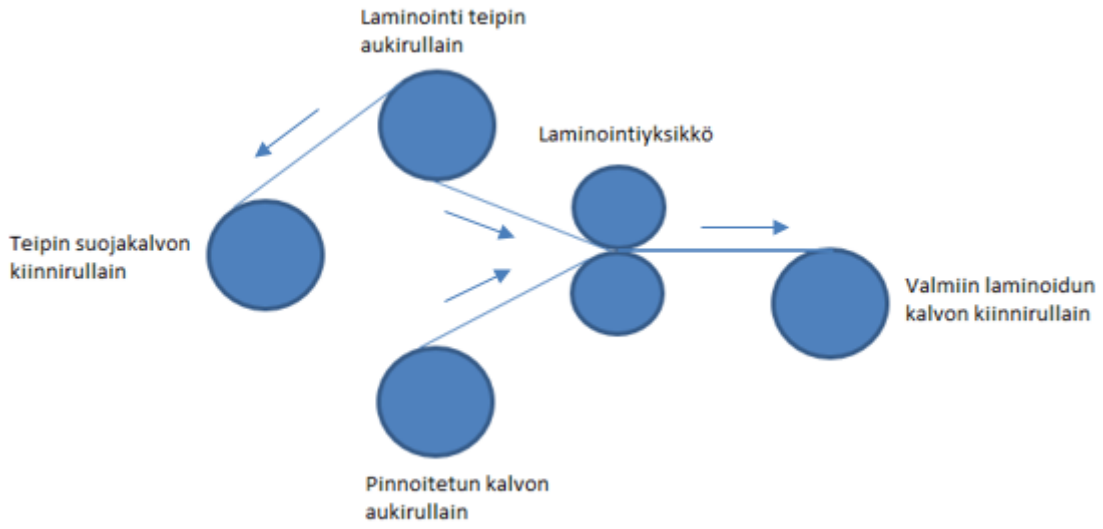
KUVA 38. MAXI-painokoneen ajon testiparametreja

Testipisteessä 11 laskettiin pumpun kierroksia materiaalin valumisen estämiseksi. Materiaalin paksuuden säilyttämiseksi ja prosessi aikojen kasvattamiseksi testipisteessä 12 laskettiin rata nopeuteen 2 m / min ja ajon aikana säädettiin pumpun kierroksia materiaalin valumisen vuoksi. Testipisteessä 13 saatiin radan nopeus sekä pumpun kierroksen optimoitua tasaisen kalvon aikaansaamiseksi.

Testipisteessä 12 pinnoite alkoi säröillä nopeuden hidastuttua, mutta säröily loppui UV tehoa laskettaessa 30 %:sta 20 %:iin. Radan nopeuden, materiaalin syötön ja UV tehon optimoinnin jälkeen testattiin suurempia kuivausuunien puhallustehoja. Testipisteissä 9 - 13 uunien puhallus tehot ovat käytännössä minimi säädöllä ja testipisteen 14 alussa esiuunien tehot nostettiin 60 % sekä molemmat pitkät uunit 80 %. Pinnoite alkoi kuitenkin kiinnirullaimelle tullessa halkeilemaan, joten pitkien uunien tehot jouduttiin laskemaan. Testipisteen 15 uunien puhallus tehot asetettiin vain hieman isommaksi kuin ensimmäisten testipisteiden tehot, jolloin pinnoite ei halkeillut.

Testipisteissä 16 - 18 testattiin eri pohjaliuottimella olevaa materiaalia. Materiaali käyttäytyi erilailla kuin aikaisempi materiaali samanlaisilla prosessi parametreilla. Materiaali halkeili 3 m / min radannopeudella, mutta nopeutta lisäämällä materiaali ei enää halkeillut prosessin loppupäässä. Viimeiseksi lähdettiin vielä ensimmäisellä materiaalilla testaamaan esikuivausuunien lämpötilojen laskemista testipisteissä 19 sekä 20.

Valmistettujen kalvojen laminointi tapahtui kuvan 39 mukaisesti eli hankittu adheesiokalvo laminoitiin substraatin pinnoittamattomalle pinnalle. Adheesiokalvossa silikooniadhessiivi on suojakalvon alla, joka poistetaan ennen itse laminointia rullaamalla se samanaikaisesti toiselle rullalle. Adhessiivikalvossa on PSA (pressure sensitive adhesive) liimaa, eli laminoinnissa ei käytetä lainkaan kuumennusta, vaan se tapahtuu pelkän paineen alaisuudessa.



KUVA 39. Laminointiprosessi yksinkertaistettuna

Laminointi toteutettiin manuaalisesti sekä MAXI-linjastolla. Manuaalisesti testipisteistä 15 sekä 20 laminoitiin noin 10 metriä molempia sekä testipisteestä loput 20 metriä MAXI-linjastolla. Testipiste 14 laminoitiin myös die-cut säätöjä varten. MAXI-linjastossa laminoitaessa radan nopeus oli 2 m / min sekä nippi noin 80 N / cm^2.

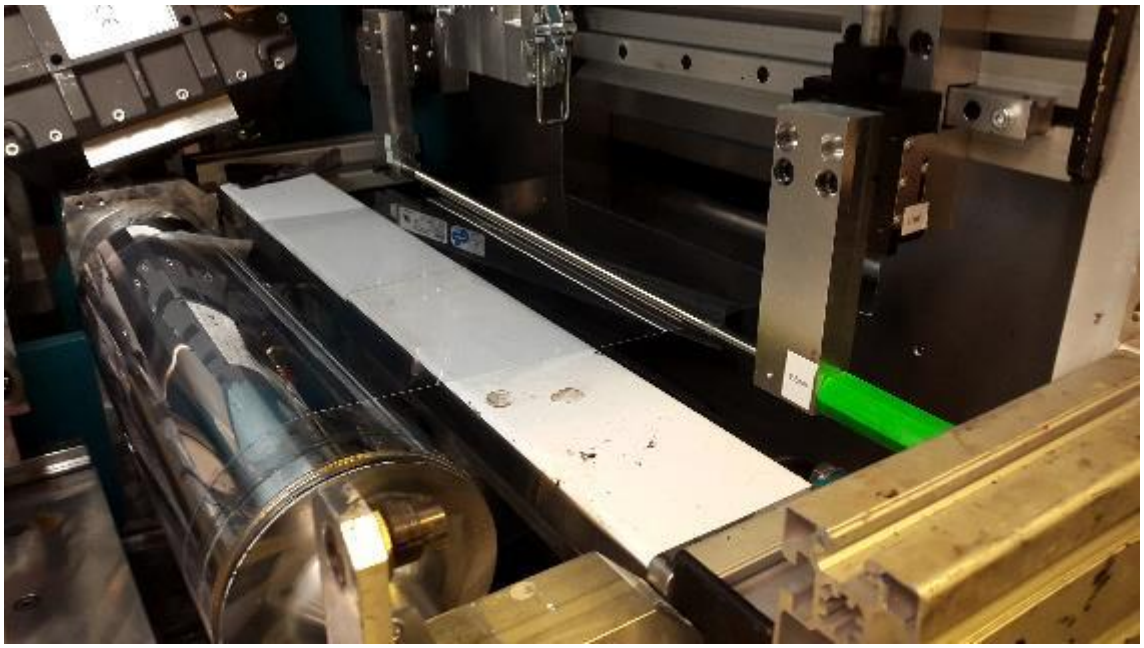
Laminoinnin jälkeen valmiita kappaleita leikattiin muotoon VTT:n rullalta rullalle jälkikäsittely yksiköllä. Jälkikäsittely yksikkö on kuvan 40 mukainen ja se sisältää die-cut- sekä pituusleikkaus-yksiköt (27). Testipisteet 15 sekä 20 päätettiin ottaa leikattavaksi muotoonsa. Leikkuumuotin toistopituus on 409,5 mm sekä leikkuupellissä on kolme muottia ja leikkaus nopeus oli 2 m / min.

KUVA 40. Rullalta rullalle jälkikäsittely yksikkö (28)

6.2.3 Kolmas testiajo

Toisessa ajossa tavoitteena oli saada tietty määrä valmiita tuotteita valmistettua sekä löytää optimi ajoparametrit valitulle materiaalille. Ajojen tulokset eivät olleet kuitenkaan odotettuja ja pinnoitemateriaali ei käyttäytynyt samalla tavalla kuin laboratorioympäristössä valmistettuna. Tulosten analysoinnin jälkeen sekä sisäisten testien jälkeen löydettiin pinnoitteen käyttäytymiselle mahdollisia syitä ja nämä päätettiin selvittää kolmannen ajon aikana.

Kolmas ajo päätettiin toteuttaa mayer rod -menetelmällä slot-die -menetelmän sijaan laitteisto ongelmien vuoksi. Mayer rod -menetelmän avulla pinnoitetun kalvon paksuus on samaa luokkaa kuin laboratorioympäristössä, joten saatavan pinnoitteen paksuus voitiin mitata. Mayer rod -pinnoitus tapahtui MAXI-linjastolla kuvan 41 mukaisesti eli käytetty pinnoitus sauva asetetaan sille valmistetulle telineelle ja materiaalin syöttö tapahtuu manuaalisesti. Kolmannen ajon tavoitteena oli selvittää toisen ajon pinnoitteen hajoamisen syyt, eli oliko pinnoite liian paksu vai johtuiko hajoaminen käytetystä lisäaineesta vai näiden kahden tekijän yhteisvaikutuksesta. Ajon tärkein tavoite on kuitenkin valita neljästä materiaalivaihtoehdosta soveltuvin materiaali sekä sille soveltuvat prosessiparametrit.



KUVA 41. MAXI-linjaston mayer rod -pinnoitus yksikkö

Ajossa testattiin neljää eri materiaalia, joista yksi materiaali on käytetty ensimmäisessä ajossa. Yksi materiaali on toisessa ajossa käytetty materiaali sekä kaksi uutta materiaali vaihtoehtoa. Ajot toteutettiin kuvan 42 testimatriisin mukaan. Ajossa käytettiin pääsääntöisesti pinnoitus sauvaa #3, mutta myös paksumpaa ja ohuempaa kalvoa tekevää sauvaa käytettiin. Pinnan paksuus mittausten ansiosta tiedettiin, että pinnoitus sauvalla #5 pinnoitettaessa pinnoitetun materiaalin paksuus on samaa luokkaa kuin toisessa ajossa hajoavan kalvon paksuus. Valmistamalla saman paksuista kalvoa kuin toisessa ajossa sekä valmistamalla ohuempaa kalvoa pystytään selvittämään liittyikö kalvon hajoaminen kalvon paksuuteen.

				Soft bake 1		Soft bake 2		UV	Bake	
Test-points	Mate-rial	Bar	Web speed (m/min)	T (°C)	%	T (°C)	%	%	T (°C)	%
TP1	#1	2	5	150	30	150	30	30	140-140 (117)	30
TP2		2	5	150	30	150	30	30	140-140 (117)	30
TP3		3	5	150	30	150	30	30	140-140 (117)	30
TP4		3	5	150	80	150	80	30	140-140 (117)	80
TP5		2	5	150	80	150	80	30	140-140 (117)	80
TP6	#2	3	5	150	30	150	30	30	140-140 (117)	30
TP7		3	5	150	80	150	80	30	140-140 (117)	80
TP8	#3	3	5	150	30	150	30	30	140-140 (117)	30
TP9		3	5	150	80	150	80	30	140-140 (117)	80
TP10	#4	3	5	150	30	150	30	15	140-140 (117)	30
TP11		3	5	150	80	150	80	15	140-140 (117)	80
TP12		3	5	150	80	150	80	30	140-140 (117)	80
TP13	#1	5	5	150	80	150	80	30	140-140 (117)	80
TP14	2	3	5	150	80	150	80	30	140-140 (117)	80
TP15	3	3	5	150	80	150	80	30	140-140 (117)	80
TP16	3	3	5	150	80	150	80	30	140-140 (117)	80
TP17	2	3	5	150	80	150	80	30	140-140 (117)	80
TP18	3	3	3	150	80	150	80	20	140-140 (117)	80

KUVA 42. Kolmannen ajon testimatriisi

Testipisteet 1 - 13 suunniteltiin tarkoin ennen itse ajo päivää aiempien kokemusten sekä sisäisten testien perusteella. Testipisteet 14 - 18 suunniteltiin ajopäivänä ajojen aikana kun 13 testipistettä toteutettiin ennen päivän loppumista. Testimatriisi suunniteltiin siten, että uunien asetus lämpötilat pidetään vakiona, mutta uunien puhallus tehoja muutetaan minimistä maksimiin. Materiaalia #1 pinnoitettiin kolmella eri sauvalla, jolloin saatiin aikaan kolme eri paksuista kalvoa. Muut materiaalit pinnoitettiin vain #3 sauvalla, koska sisäisten testien perusteella parhaat pinnan ominaisuudet saavutetaan tällä kalvon paksuudella.

Testipisteissä 14 - 18 päätettiin ajojen aikana laittaa myös toinen pidempi kuivausuuni käyttöön samoihin asetuksiin kuin ensimmäinen pitkä kuivausuuni. Tällöin nähdään, onko pidemmällä kuivausajalla vaikutusta lopullisen kalvon ominaisuuksiin. Koska seuraavat ajot suunniteltiin toteutettavan slot-die-pinnoitusmenetelmällä, oli testipisteissä TP1 - TP17 radan nopeus 5 m / min. Testipiste 18 testattiin kuitenkin hitaammalla 3 m / min radannopeudella nähdäksemme, onko pidemmillä uuni ajalla merkitystä pinnoitteen ominaisuuksiin.

7 TULOKSET

7.1 Syväpainomenetelmän testauksen tulokset

PrinLabin SOM100-painokoneella tehdyt syväpainomenetelmän testit olivat lupaavia. Itse painokoneen käyttö oli helppoa ja sen käyttö onnistui hyvin. Syväpainomenetelmää käytettäessä tarvittiin yksi henkilö syöttämään materiaalia manuaalisesti syväpainosylinterin päälle ajon aikana, sillä painoyksikössä ei ole minkäänlaista materiaalin syöttö yksikköä tai kaukaloa. Testin tarkoituksena oli saada kuvaa mikä syväpainosylinterin kuviointi sopisi hyvin käytetyille materiaaleille eli pinnoitetuista kalvoista testattiin kovuus arvo PEHA-mittauksella sekä teräsvillalla testattiin kalvon naarmutus kestävyyttä. Testin tulokset ovat taulukon 7 mukaiset.

TAULUKKO 7. Ensimmäisen syväpainomenetelmän testauksen tulokset

Testipiste	Testisylinteri	Materiaali	Radan nopeus (m / min)	Nippipaine (bar)	Teräsvilla	Kovuus	Kontakti kulma (°)
S1	PTS03	#4	3	2,5	Pehmeä	2H<3H	-
S2	PTS03	#4	6	2,5	Erittäin pehmeä	-	-
S3	PTS03	#4	6	2,5	Pehmeä	<3H	-
S4	PTS03	#3	9	2,5	Hyvä	≈3H	-
S5	PTS03	#3	9	2,5	Hyvä	3H	96
S6	PTS03	#3	6	2,5	Erittäin pehmeä	<3H	-
S7	PTS04	#3	4	2,5	Pehmeä/Ok	≈3H	-
S8	PTS04	#3	9	2,5	Pehmeä/ok	≈3H	-
S9	PTS04	#1	4	2,5	Pehmeä/Ok	<3H	-

Pinnoitettujen kalvojen tavoitekovuusarvo on 3H sekä hyvä teräsvillan kestävyys. Testien perusteella testipisteiden S4 ja S5 materiaali sekä radan nopeus tuottavat tavoitteen mukaisen kalvon. PTS03 testisylinterissä selkeästi ominaisuuksia testatessa parhaan kalvon tuottivat 60 / 120° sekä 70 / 120° kuviot. Materiaalin #4 tiedettiin tuottavan ohuempaa kalvoa verrattuna materiaaliin #1 sekä #3 sekä PTS03 testisylinterin kuvion 60 / 120° tiedettiin teoriassa tuottavan paksuimman kalvon substraatille. PTS04 pinnoitussylinterillä tehdyissä S7 ja S8 testipisteiden välillä ei huomattu eroja ominaisuuksissa, vaikkakin ne on tehty eri pinnoitusnopeuksilla. Toisin kuin PTS03 pinnoitussylinterillä tehdyissä testeissä nopeudella huomattiin olevan vaikutusta pinnoitteen ominaisuuksiin.

Materiaali #3 testattiin myös sisäisesti mayer rod -pinnoitusmenetelmällä laboratorioympäristössä ja tulokset löytyvät taulukosta 8. Sisäisen testin perusteella voidaan väittää että materiaali kerroksen kasvaessa pinnoitteen ominaisuudet paranevat.

TAULUKKO 8. Materiaalin #3 sisäisen testin tulokset

Materiaali	**Mayer rod -sauva**	**Teräsvilla**	**Kovuus**	**Kontaktikulma (°)**
#3	#2	Ok	<3H	99
#3	#3	Hyvä	≈3H	101

Vaikkakin testipisteen S5 ja sisäisesti pinnoitetun kalvon ominaisuudet ovat lähes samanlaiset, ei voida täysin varmasti sanoa, että ne ovat saman paksuiset kalvot. Pinnoitettujen kalvon ominaisuuksiin voi vaikuttaa moni muukin tekijä kuin pinnoitteen paksuus, kuten käytetty prosessi ja pinnoitusmenetelmä.

Pinnoitettujen kalvojen optiset ominaisuudet olivat hyviä. Kalvot olivat kirkkaita, mutta niissä oli visuaalisesti nähtävissä kuitenkin pinnan epätasaisuutta. Visuaalisesti nähtäviä raitoja näkyi selvemmin PTS04 pinnoitussylinterillä tehdyissä kalvoissa etenkin testipisteessä S9, jossa käytettiin eri materiaalia. Taulukon 9 testipisteissä lähdettiin tutkimaan johtuvatko pinnoitteen epätasaisuudet pinnoitemateriaalista vaiko itse testimenetelmästä. Testissä testattiin neljää eri materiaalia, joissa kaikissa oli eri kiintoainepitoisuudet. Materiaalissa kiintoainepitoisuuden kasvaessa sen viskositeetti myös kasvaa sekä pinnoitetun kalvon paksuus kasvaa.

TAULUKKO 9. Toisen syväpainomenetelmän testauksen tulokset

Testipiste	Testisylinteri	Materiaali	Radan nopeus (m / min)	Nippipaine (bar)	Teräsvilla	Kovuus
S10	PTS04	#3	9	2,5	Pehmeä	<3H
S11	PTS04	#5	9	2,5	Pehmeä	<3H
S12	PTS04	#6	9	2,5	Pehmeä	<3H
S13	PTS04	#6	9	3,5	Pehmeä	<3H
S14	PTS04	#1	9	2,5	Erittäin pehmeä	<3H
S15	PTS04	#6	12	3,5	Pehmeä	<3H
S16	PTS03	#3	9	3,5	Pehmeä/Ok	<3H
S17	PTS03	#5	9	3,5	Hyvä	≈3H
S18	PTS03	#6	9	3,5	Hyvä	≈3H

Pinnoitteen visuaalinen jälki parantui materiaalin kiintoainepitoisuuden noustessa. Suurimmassa kiintoainepitoisuuden omaavan materiaalin eli materiaalin numero 6 kalvoissa oli kuitenkin vieläkin nähtävissä pientä pinnanpaksuuden vaihtelua. Testipisteet S12 sekä S17 olivat kuitenkin visuaalisesti parhaimman näköisiä kalvoja. Testisylinterin PTS03 testipisteistä parhaiten onnistui S17, jossa visuaalinen laatu oli kaikissa testiraidoissa hyvä sekä ominaisuudet lähellä tavoitetta.

Pinnoitettaessa suuremman kiintoainepitoisuuden omaavia materiaaleja #5 ja #6 syntyi kuitenkin ongelmia, koska materiaali alkoi vaahtoamaan pinnoitustelan sekä pyyhkijäterän välissä. Vaahdonnut materiaali jäi kuitenkin substraatin reunoille ja ei vaikuttanut testituloksiin. Testipisteissä S12 ja S13 testattiin nippipaineen vaikutusta pinnoitukseen ja pinnoitteen ominaisuuksiin. Suurta eroa ei ollut kuitenkaan nähtävissä 2,5 baarin ja 3,5 baarin välillä. Ajon

aikana arvioitiin että 3,5 baarin nippipaineella aikaan saatiin visuaalisesti paremman näköinen kalvo.

Testipisteiden S13 ja S15 välillä ei ollut eroja pinnoitteen ominaisuuksissa tai visuaalisessa laadussa. Näiden testipisteiden ainoa ero oli että radan nopeutta nostettiin 9 m / min nopeudesta 12 m / min nopeuteen. Suurempia nopeuksia ei lähdetty testaamaan testausmenetelmän vuoksi. Jos materiaalin syöttö syväpainoyksikössä tapahtuisi manuaalisen sijaan automatisoidusti, suurempia nopeuksia olisi voitu kokeilla.

7.2 SOM100-painokoneen rullalta rullalle -prosessin tulokset

Ensimmäisessä rullalta rullalle -prosessin testauksessa PrinLabin SOM100-painokoneella lähdettiin kokeilemaan, toimivatko tehdyt telojen korotukset sekä ohjausrulla. Tehdyt korotukset vaativat harjoittelua ja säätämistä, että ne saatiin pysymään paikoillaan. Säätämisen jälkeen korotukset pysyivät kohtuullisesti paikoillaan ja ohjausrulla toimi asianmukaisesti. Säätöjen jälkeen ehdittiin materiaalejakin testata koko rullalta rullalle -prosessina. Tehtyjen testien tuloksena (SP1 - SP4) saatiin aikaan sumean näköistä kalvoa. Pinnoitetut kalvot eivät olleet yhtenäisen näköisiä ja ne sisälsivät pieniä pisteitä ja paljon muitakin pinnan virheitä.

Pinnoitetuille kalvoille tehtiin nopea etanoli pyyhkäisy testi, jonka avulla nähtiin nopeasti, onko materiaalin ja substraatin adheesio kunnossa. SP1 - SP4 kestivät etanolia, mutta kalvojen heikon visuaalisen laadun takia muita arvoja ei kalvoista lähdetty testaamaan. SP4 kalvossa oli kuitenkin nähtävissä osittain yhtenäistä ja kirkasta kalvoa telan 70 / 120° sekä 80 / 120° kuvioissa. Tämän takia seuraavat testit lähdettiin toteuttamaan pelkästään PTS03 testisylinterillä.

Päättelin pinnoitetun materiaalin sameuden johtuvan materiaalin huonosta siirtymisestä sylinteriltä substraatille. Materiaalin paremmaksi siirtymiseksi sylinteriltä substraatille lähdettiin kokeilemaan materiaalin viskositeetin alentamista, käyttämällä alhaisemman viskositeetin omaavia liuottimia sekä materiaalin kiintoainepitoisuutta laskemalla. Materiaalien viskositeetti saatiin todella alhaiseksi, eli alle 5 mPa*s. Viskositeetin laskeminen ei kuitenkaan auttanut huonoon pinnan visuaaliseen laatuun.

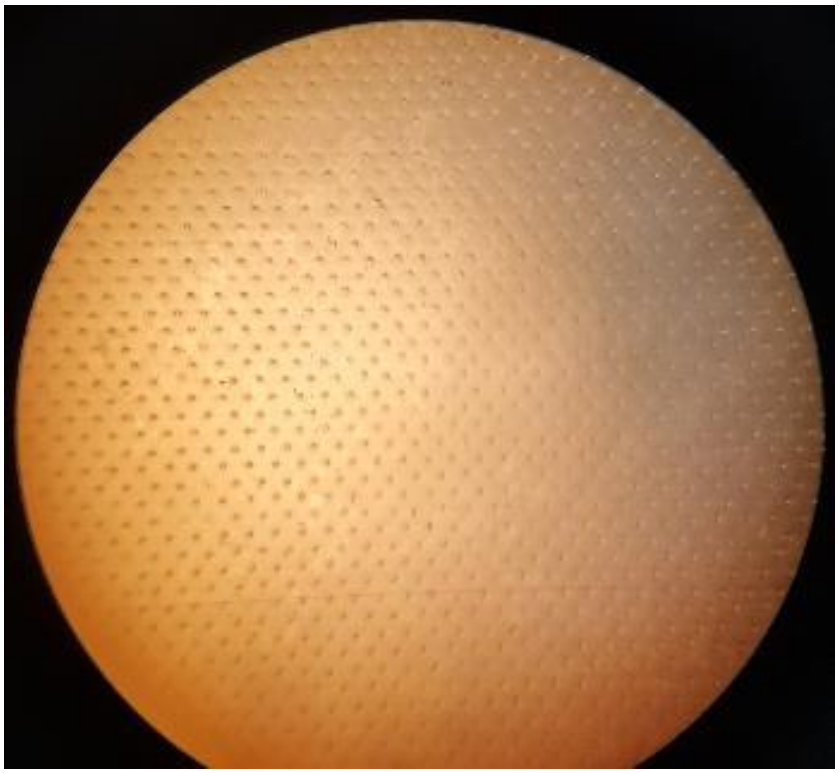
Käytetyissä liuottimissa huomattiin kuitenkin pieniä eroja visuaalista laatua vertailemalla. Materiaalin #7 liuottimet näyttivät sopivan paremmin syväpainomenetelmän kanssa kuin materiaalin #8, mutta kalvojen laatu ei silti ollut tarpeeksi hyvä. Kiintoainepitoisuuden laskiessa pinnoitetut kalvot eivät enää kestäneet etanoli pyyhkäisyä, vaan pinnoite pyyhkiytyi irti

substraatista. Tämä voi johtua liuottimien määrän kasvusta, eli kaikki liuottimet eivät ehdi haihtumaan prosessin aikana.

Materiaalin huono adheesio voi johtua myös käytetystä UV-valaisimesta. Laboratoriotesteissä käytetty UV-valaisin on huomattavasti tehokkaampi verrattuna rullalta rullalle -testeissä käytettyyn UV-valaisimeen. UV-valotus aika on huomattavasti lyhempi kuin laboratoriotesteissä. Tehokkaamman UV-valaisimen hankintaa en pitänyt järkevänä suurten kustannusten ja tämän hetkisten tulosten takia.

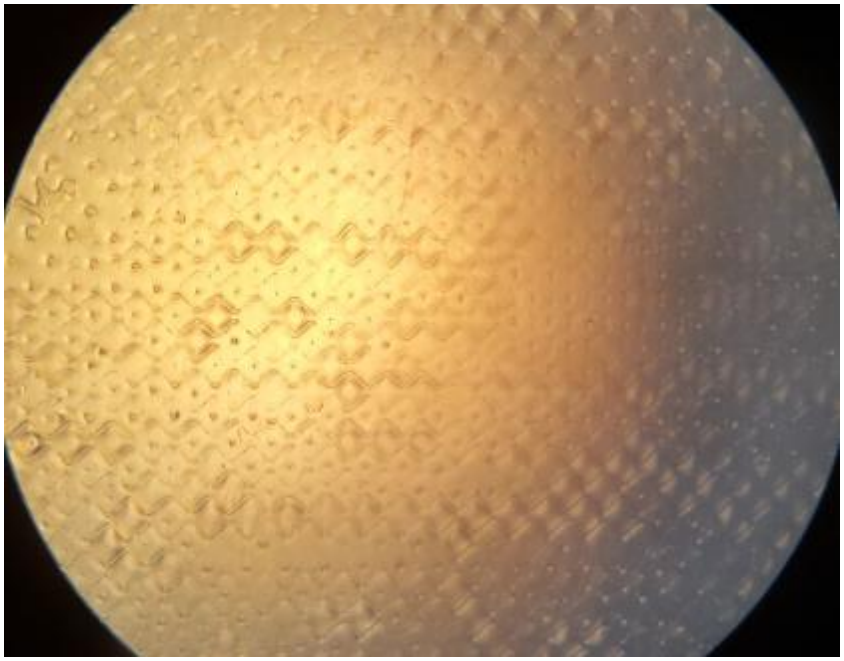
Kalvon laatua yritettiin parantaa myös kokeilemalla eri radan nopeuksia sekä nipin painetta. Kalvon visuaalisessa laadussa ei näkynyt eroja eri painonopeuksilla tai nippipaineella. Testipisteissä SP5 - SP9 käytettiin myös eri pyyhkijän terää kuin aikaisemmin ja pyyhkijän terän vaihtamisella ei huomattu olevan vaikutusta pinnoitukseen. Testipisteissä SP16 ja SP17 kokeiltiin vielä ottaa pois esikuivausuuni käytöstä. Esikuivausuunin pois ottamisella oli huomattava vaikutus pinnoitteen tasaisuuteen. Testipisteet SP16 sekä SP17 olivat huomattavasti tasaisempia kuin aikaisemmat testipisteet. Näissä testipisteissä oli kuitenkin nähtävissä pientä raitaa.

Samean kalvon syyksi testien perusteella arvelin olevan materiaalin huono tasoittuminen substraatilla. Sameaa pinnoitettua kalvoa tarkastellessa mikroskoopilla, nähdään sameuden aiheuttaja kalvossa. Kuvassa 43 on yhdestä sameasta kalvosta otettu kuva mikroskoopin avulla ja kuvassa nähdään olevan paljon pisteitä tasaisin välein. Pisteet ovat kohtia, joissa pinnoitetta ei ole tarpeeksi. Materiaali ei siis ole ehtinyt asettua ennen ensimmäistä kuivausuunia. Tämän vuoksi kalvot, jotka prosessoitiin ilman ensimmäistä kuivausuunia, olivat visuaaliselta laadultaan parempia.



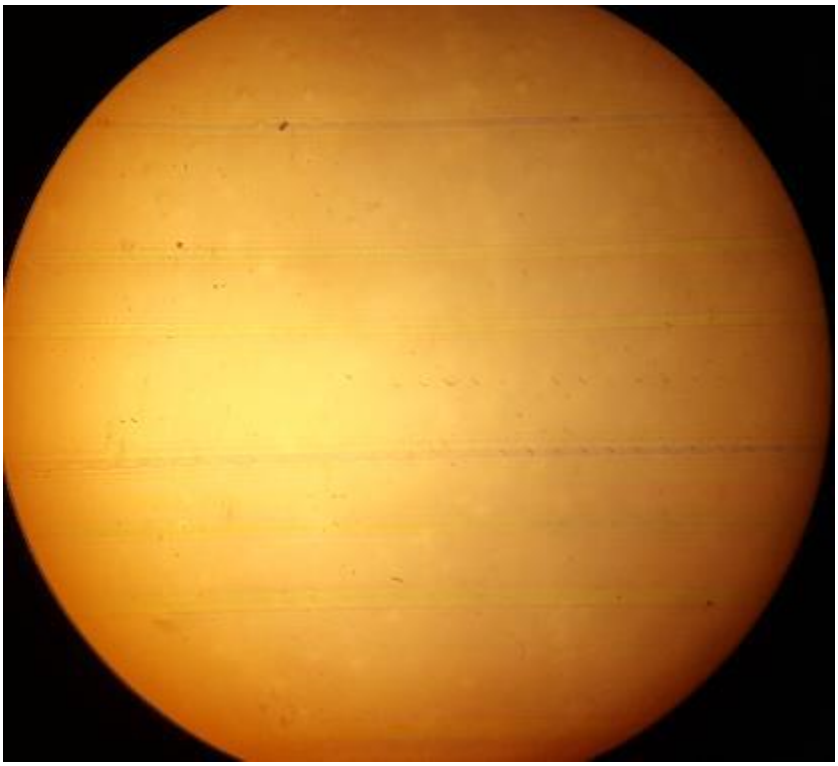
KUVA 43. Samea kalvo

Pisteiden synty voidaan paremmin hahmottaa kuvasta 44. Kuvasta nähdään, että piste muodostuu kuopan keskelle. Pisteen syntyminen kuvion keskelle voi johtua materiaalin huonosta tai liian vähäisestä siirtymisestä telalle.



KUVA 44. Samean kalvon aiheuttaja

Testipisteestä SP16 otetussa kuvasta 45 nähdään, että se on tasoittunut huomattavasti paremmin kuin samea testipiste. Kuvasta nähdään kuitenkin että testipisteissä näkyvät raidat ovat viivoja, joissa ei ole pinnoitetta tarpeeksi. Ilman esikuivausuunia tehdyt testipisteetkään, eivät olleet tasoittuneet tarpeeksi ennen pinnoitteen asettumista. Testipisteissä SP16 ja SP17 nähtiin eroja raitojen määrässä eri pinnoitus parametrien raidoissa. Vähiten raitoja on nähtävissä 140° stylus kulmalla valmistetuissa raidoissa. Raitojen määrä kuitenkin vaihteli suuresti eri pinnoitusparametreilla.



KUVA 45. Testipiste SP16

VTT:n tasosyväpainokoneella tehdyissä testeissä ei huomattu plasman auttavan pinnan visuaaliseen laatuun. Pinnan tasaisuutta katsottaessa painosylinterin kuviot 48/0, 54/0, 80/0 sekä 90/0 olivat parhaita. Pinnoituksen laatu oli samaa luokkaa kuin ensimmäisten PrinLabilla tehtyjen testien pinnoitusten. Arkkimuodossa prosessoidut kalvot tasoittuvat paremmin kuin rullalta rullalle -prosessissa valmistetut kalvot. Rullalta rullalle -prosessissa käytetyissä kuumailmapuhallus uuneissa liuottimet näyttävät haihtuvan nopeampaa kuin tavallisessa vastusuunissa, jolloin pinnoitusmateriaali kuivuu nopeammin substraatille.

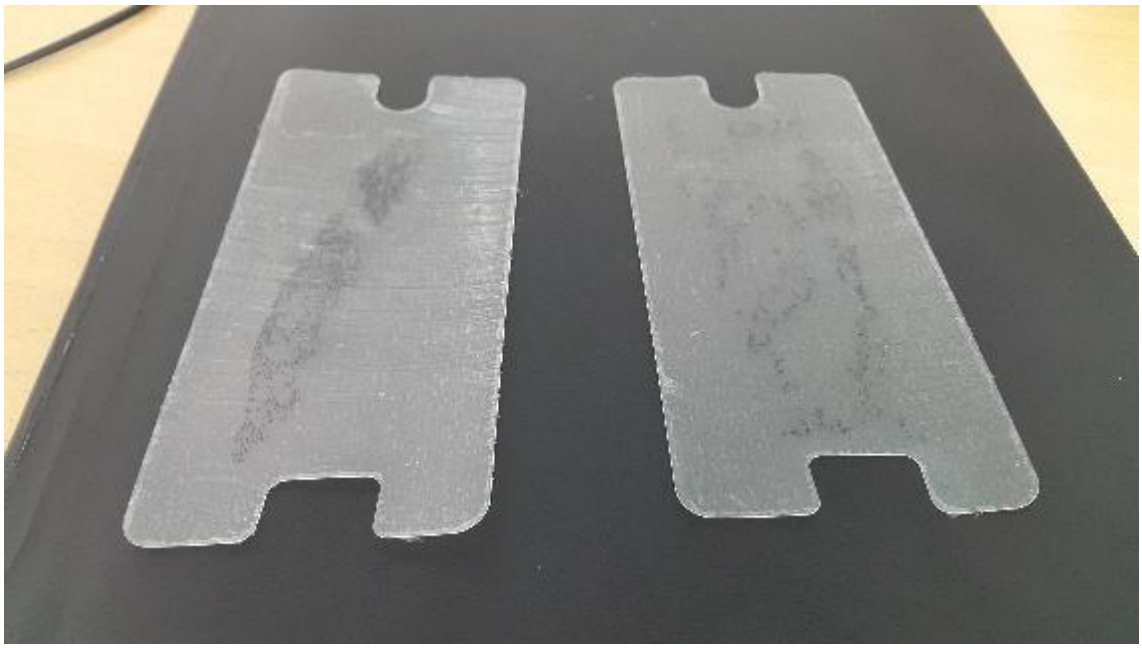
7.3 MAXI-painokoneen testiajojen tulokset

Toinen testiajo MAXI-painokoneella onnistui käytännön kannalta hyvin. Testipisteitä saatiin paljon aikaan sekä substraattia käytettiin noin 700 metriä. Pinnoituksen tulokset olivat alustavasti hyviä, lukuun ottamatta paria testipistettä, jotka halkeilivat ajon aikana. Pinnoitetut kalvot olivat visuaaliselta laadultaan hyviä ja alustavien testien mukaan pinnoitteen naarmuuntumiskestävyys oli hyvä. Testien aikana testattiin eri radan nopeuksia, materiaalin syöttöpumpun kierroksia, kuivausuunien tehoja sekä esiuunien lämpötiloja. Parametrit saatiin optimoitua tasaisen ja hyvän kalvon aikaansaamiseksi.

Kovuus mittausten aikana aloin kuitenkin huomaamaan, että pinnoitetut kalvot eivät käyttäytyneet samalla tavalla kuin laboratorioympäristössä tehdyt kalvot. Kovuutta mitatessa 3H kynällä, kynä upposi pinnoituksen läpi hajottamalla pinnoituksen kokonaan. Normaalisti kovuutta mitatessa pinnoitukseen jää vain naarmu ja pinnoitteet eivät hajoa kokonaan testin aikana.

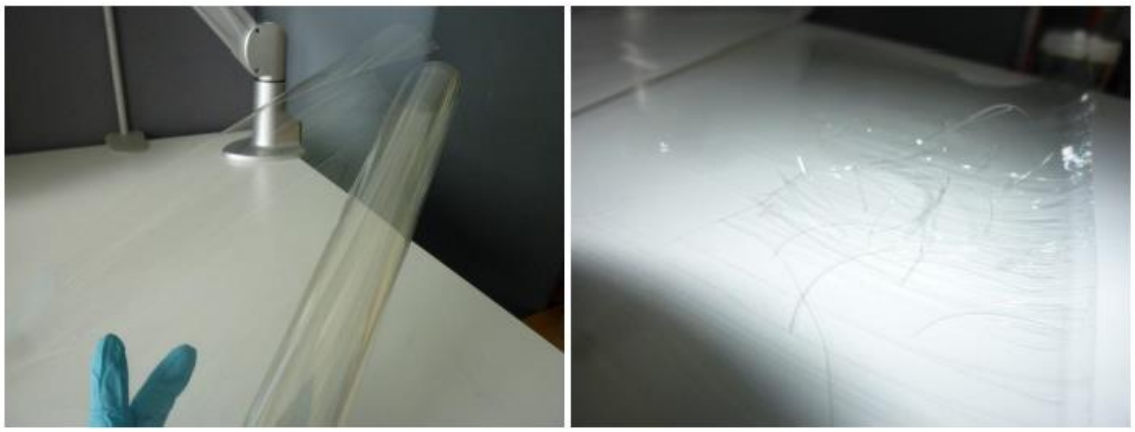
Pinnoitetuista testipisteistä valittiin laminoitavaksi kuitenkin testipisteet 15 ja 20 niiden hyvän visuaalisen laadun sekä naarmuuntumiskestävyyden vuoksi. Pinnoitteiden laminointi onnistui hyvin MAXI-painolinjastolla. Käytetty laminointikalvo oli kuitenkin väärä ajateltuun sovellukseen. Laminointikalvon liima oli samea, joten se ei soveltunut puhelimen suojakalvoksi. Testipisteet päätettiin kuitenkin laminoida ja leikata muotoon nähdäksemme miten materiaali käyttäytyy prosessien aikana.

Die-cut -prosessikaan ei onnistunut ilman ongelmia. Tilattu leikkaustyökalu ei leikannut kappaleita täysin irti kalvosta, eli arvioitu pinnoitteen, substraatin ja laminointikalvon yhteispaksuus ei ollut oikea. Leikkauksen aikana huomattiin myös että pinnoitettu kalvo hajosi leikkauskohdasta. Kuvassa 46, nähdään että leikkuu työkalu on hajottanut pinnoitteen kappaleiden reunoilta sekä kuvasta nähdään myös laminointikalvon optinen laatu. Valmiita kappaleita kokeiltaessa iPhone 5 -puhelimen päällä huomattiin myös, että mallinnetun työkalun kulmien säde oli liian pieni. Sädettä mitatessa oli tapahtunut virhe ja säde olisi pitänyt olla suurempi, jotta suojakalvo olisi sopinut paremmin puhelimen päälle.



KUVA 46. Valmiit demokappaleet

Muutama päivä testiajojen jälkeen huomattiin myös että kaikki pinnoitetut kalvot olivat halkeilleet ja pinnoite oli irronnut substraatista. Kuvassa 47 nähdään pinnoitettu kalvo pinnoituksen jälkeen sekä muutama päivä pinnoituksen jälkeen. Pinnoituksen hajoamisen syitä ei vielä osata täysin arvioida. Alustavasti arvioitiin, että joko pinnoituksen paksuus on liian suuri tai materiaalissa käytetty lisäaine ei sovellu käytettyyn materiaalin ja prosessiin.



KUVA 47. Toisessa testiajossa pinnoitettu kalvo pinnoituspäivänä sekä muutama päivä pinnoittamisesta

Ennen seuraavaa ajoa täytyi selvittää mistä materiaalin hajoaminen johtui. Erona aikaisempaan ajoon oli materiaalin muutokset, sekä pinnoitteen paksuus. Pinnoitteiden paksuutta ei ole

aikaisemmin mitattu mayer rod -pinnoitetuista kalvoista eikä slot-die-pinnoitetuista kalvoista. Pinnoitettujen kalvojen paksuus päätettiin mitata VTT:n DekTak profilometrillä sekä Filmetrics:llä. Dektak profilometrillä saadaan substraatin ja pinnoitetun pinnan korkeusero selville sekä Filmetrics:llä pinnan paksuus saadaan selville valon aallonpituuksien avulla. Saadut mittaustulokset osoittivat, että toisessa ajossa pinnoitetut kalvot olivat paksumpia kuin sisäisesti mayer rod -pinnoituksella valmistetut kalvot. Pinnoitteen paksuutta ei voitu kuitenkaan pitää ainoana syynä kalvon hajoamiselle. Testipiste 9 tehtiin referenssiksi ensimmäisen testiajon mukaan ja tuolloin pinnoitetut kalvot eivät hajonneet.

Kalvon hajoamisen syyn selvittelyn jälkeen päätettiin toteuttaa vielä kolmas ajo MAXI-painokoneella. Testiajossa käytettiin mayer rod -sauvoja slot-die-pinnoitusmenetelmän sijaan. Mayer rod -sauvoilla tiedettiin saavan tasaista saman paksuista kalvoa aikaan ja pinnoitteen paksuutta on helppo säädellä sauvaa vaihtamalla. Testiajojen tulokset näkyvät kuvassa 48. Testipisteille tehtiin kattavat ominaisuuksien testaukset. Niistä testattiin kovuus (PEHA), narmuuntumiskestävyys (SW), kontaktikulma (CA), kulutuskestävyys (CA after 1000c), adheesio (adhesion) sekä pinnoitteen paksuus (film thickness µm).

TP:	Material:	BAR:	VQ:	SW:	PEHA:	CA (°):	CA after 1000c (°):	Adhesion:	film thickness
1	1	2	good	soft	2H	103	69 scratch	5B	2,4
2	1	2	good	soft	2H	103	72 scratch	4-5B	2,4
3	1	3	good	OK	2H	103	69 scratch	4-5B	5,3
4	1	3	good	OK	≈3H	103	70 scratch	4-5B	5,2
5	1	2	good	soft	≈3H	104	70 ≈scratch	5B	2,4
6	2	3	good	soft	2H	104	74 + scratch	5B	4,9
7	2	3	good	OK	2H	103	78 small scratch - HYVÄ	5B	4,9
8	3	3	good	Soft/Ok	2H	103	70 scratch	4-5B	n.d.
9	3	3	good	Good	2H	104	67 ≈scratch	4-5B	4,8
10	4	3	good	Ok/Good	2H	103	67 scratch	4-5B	5,1
11	4	3	good	Ok	2H	104	65 scratch	4-5B	5
12	4	3	good	Ok	2H	103	66 no scratch	4-5B	5,1
13	1	5	cracked		-	-	-		11,9
14	2	3	good	Soft/Ok	<2H	103	71 scratch	4-5B	4,9
15	3	3	good	Soft/Ok	2H	103	68 no scratch	5B	4,7
16	3	3	foggy	Soft!!!	2H	102	70 puhki	5B	4,8
17	2	3	foggy	Soft!!!	<2H	103	75 large scratches	5B	4,8
18	3	3	good	Soft/Ok	2H	104	80 small scratch	5B	5,1

KUVA 48. Kolmannen testiajon tulokset

Tulokset olivat hyvin samanlaisia keskenään ja toisen ajon pinnoitteen hajoamisen syy pystyttiin verifioimaan tulosten avulla. Testipisteissä 1 - 5 sekä 13 on käytetty samaa materiaalia kuin toisessa ajossa. Testipisteet on pinnoitettu erilaista kalvonpaksuutta tuottavalla sauvalla ja erilaisilla prosessiparametreilla. Tuloksista nähdään, että pinnoite on kestänyt rullalta rullalle -prosessin alhaisemmissa kerrospaksuuksissa, mutta hajonnut prosessin aikana paksuuden kasvaessa noin 12 mikrometriin. Materiaaleille tehtiin myös taivutustestit, joissa huomattiin 5 µm:n kalvonpaksuisista materiaaleista numeron 1 säröilevän eniten taivutuksen alaisena.

Materiaali 1 pinnoitussauvalla 3 pinnoitettuna on kuitenkin lähimpänä tavoite kovuus arvoa 3H. Materiaalia ei kuitenkaan voida tuotannollistaa, koska sen applikaatiot on ajateltu olevan taipuisan elektroniikan applikaatioita. Materiaali ei ole riittävän taipuisa käytettäväksi taipuisiin applikaatioihin. Materiaalia 4 ei myöskään voida ajatella tuotannollistettavaksi sen huonon taipuisuuden takia. Materiaalit 2 ja 3 ovat soveltuvampia taipuisan elektroniikan applikaatioihin.

Materiaalit 2 ja 3 olivat tulosten mukaan hyvin samanlaisia. Yllättävää tuloksissa oli testipisteiden 14 - 18 tulokset. Toisen pitkän kuivausuunin tuominen prosessiin ei parantanut millään tavalla pinnoitteen ominaisuuksia sekä radan nopeutta laskemalla (TP18) ei ollut suurta vaikutusta pinnoitteen ominaisuuksiin. Testipisteissä 16 ja 17 kokeiltiin kasvattaa esikuivausuunien lämpötilaa lämmittämällä uunien alaosaa, mutta tämä tuotti osittain sameita kalvoja. Kuivausuunien puhallustehoilla on tulosten perusteilla pieni vaikutus pinnoituksen ominaisuuksiin. Esimerkiksi testipisteessä 6 on käytetty 30 %:in puhallustehoja kun taas testipisteessä 7 on käytetty 80 %:in puhallustehoja. Testipisteessä 7 on hieman parempi naarmuuntumiskestävyys verrattuna testipisteeseen 6.

Pinnoitettujen kalvojen visuaalinen laatu oli hyvä, mutta kalvoissa oli kuitenkin nähtävissä pieniä pisteitä. Pisteitä on myös nähtävissä laboratorioympäristössä pinnoitetuissa kalvoissa. Mayer rod -pinnoitusmenetelmä soveltuu hyvin materiaalin pinnoitusmenetelmäksi isommassakin skaalassa, edellyttäen että pienet pinnan virheet eivät haittaa lopputuotteessa.

7.4 Tulosten yhteenveto

PrinLabin SOM100-painokoneella ei pystytty valmistamaan tasaista ja tarvittavia ominaisuuksia omaavaa pinnoitetta syväpainomenetelmällä rullalta rullalle -prosessissa. Kehitettävien materiaalien pinnoittaminen SOM100-painokoneella onnistuneesti vaatisi radan muuttamista pidemmäksi. Syväpainoyksikön ja ensimmäisen kuivausuunin välinen matka tulisi olla pidempi,

jotta materiaali tasoittuisi yhtenäiseksi pinnaksi ennen kuivausta. Materiaalien kehittämiseksi painokoneeseen pitäisi hankkia UV-valaisin. Testeissä huomattiin että käytetty 35 W UV-valaisin ei ollut tarpeeksi tehokas rullalta rullalle -prosessiin.

Toinen testiajo MAXI-painolinjastolla ei onnistunut kokonaisuudessa kovin hyvin. Testiajossa käytetty materiaali ei pysynyt substraatissa, käytetty laminointikalvo oli väärä sekä leikkuu työkalu oli väärin suunniteltu. Ajon tuloksena voidaan kuitenkin sanoa, että Optitune Oy:n materiaaleista pystytään valmistamaan tuotteita rullalta rullalle -prosessissa VTT:n MAXI-painolinjastolla. Pinnoitus, laminointi ja die-cut -leikkuu onnistuivat rullalta rullalle -prosessissa hyvin. Pinnoitettu kalvo oli kirkas ja se ei naarmuuntunut helposti. Materiaaleja tulee kehittää ennen seuraava ajoa parantamalla materiaalin ja substraatin välistä adheesiota.

Kolmannessa MAXI-painolinjastolla tehdyssä testiajossa pinnoitettujen materiaalien ominaisuuksissa oli hyvin vähän eroja. Materiaalit 1 ja 4 kuitenkin pystyttiin hylkäämään niiden huonon taipuisuuden vuoksi. Materiaalien 2 ja 3 väliltä on vaikeaa valita, kumpi soveltuisi paremmin lopputuotteeseen. Materiaali 3 on testien perusteella hieman parempi kuin materiaali 2. Materiaalin 2 kovuus laskee alle 2H testipisteissä 14 ja 17, mutta materiaalin 3 kovuus pysyy samana erilaisia prosessi parametreja käytettäessä. Tämän perusteella valitsisin materiaalin 3 käytettäväksi seuraavassa rullalta rullalle -ajoissa.

8 YHTEENVETO

Painettavan pinnoitteen tuotannollistaminen aloitettiin keväällä 2015 tutustumalla pinnoittamiseen käytettävään materiaaliin sekä sen prosessointiin ja testaamiseen laboratorioympäristössä. Tutustuin myös aiempiin VTT:n MAXI-painokoneen testiajoihin sekä tuloksiin, joista sain käsityksen laboratorio- sekä tuotantoympäristöjen eroavaisuuksista. Ennen työn aloittamista tein myös PrinLabille projektiopinnon, jossa tein käyttöohjeet SOM100-painokoneeseen. Tällöin tutustuin tarkemmin painokoneeseen, sen käyttöön sekä siinä käytettäviin painomenetelmiin.

Jo painokoneeseen sekä materiaaliin tutustumisen jälkeen huomasin, ettei kehitettäviä materiaaleja pystytä testaamaan täysin rullalta rullalle -prosessina PrinLabin SOM100-painokoneella. Painokoneessa ei ollut tarvittavia prosessointivälineitä materiaalin loppuun kehittämiseen. Päätin kuitenkin kokeilla SOM100-painokoneella materiaalin toimivuutta syväpainomenetelmällä soveltaen kokemuksia laboratorioympäristön prosessista. Näiden tulosten perusteella syväpainomenetelmä vaikutti lupaavalta vaihtoehdolta materiaalin painomenetelmäksi, ja aloin miettimään, kuinka materiaaleja pystyttäisiin testaamaan SOM100-painokoneella ilman suuria investointeja.

PrinLabin uuden kuivausuunin hankinnan sekä pienen ohjausrullan valmistuksen avulla materiaaleja päästiin kokeilemaan SOM100-painokoneella täysin rullalta rullalle -prosessina. Täyden rullalta rullalle -prosessin tulokset olivat hieman yllättäviä. Tulokset eivät vastanneet aikaisempia testituloksia visuaaliselta laadultaan. UV-valaisimen riittämättömyys vaikutti selvästi materiaalin kehitettävyyteen, mutta puutetta yritettiin kompensoida käyttämällä eri lisäainetta. Lisätutkimukset syväpainomenetelmän ja materiaalien toimivuudesta SOM100-painokoneella vaatisivat UV-valaisimen hankintaa ja uuden syväpainosylinterin suunnittelua sekä syväpainoyksikön uudelleen sijoittamista painokoneessa.

VTT:n MAXI-painokoneen testiajot sujuivat hyvin. Harmillisesti toisessa testiajossa pinnoitettu materiaali ei käyttäytynyt oletetulla tavalla ja lähti hajoamaan muutaman päivän kuluttua ajoista. Materiaalin hajoamisen syy kuitenkin selvitettiin ajojen jälkeen ja verifioitiin kolmannessa ajossa. Kolmas testiajo painokoneella tehtiin tehokkaasti ja suunniteltu testimatriisi toteutettiin sekä pystyttiin testaamaan hieman myös ideoita testimatriisin ulkopuolelta.

Kolmannen testiajon tulokset olivat yllättäviä sekä odotettuja. Toiseen testiajoon verrattavissa olevat tulokset olivat odotusten mukaiset, mutta muuten testitulokset olivat yllättävän

samankaltaisia. Kolmannen testiajon tuloksista kuitenkin pystyttiin valitsemaan tuotantoon sopiva materiaali ja sen prosessiparametrit. Yhtäkään ehjää pinnoitettua mallikappaletta ei ehditty valmistaa opinnäytetyön aikana.

LÄHTEET

1. Optitune Oy. Saatavissa: http://www.optitune.com/. Hakupäivä 8.5.2016.

2. Gamota, R. Daniel – Brazis, Paul – Kalyanasundaram, Krishna – Zhang, Jie 2004. Printed organic and molecular electronics. USA: Kluwer Academic Publishers.

3. Yuan, Yuehua - Lee, T. Randall 2013. Contact Angle and Wetting Properties. Houston, USA: Springer -Verlag Berin Heidelber.

4. Rame-hart. Saatavissa: http://www.ramehart.com/index.htm. Hakupäivä 1.5.2016.

5. Koleske, V. Joseph. Mechanic al Properties of Solid Coatings. Charleston, USA. Saatavissa: http://www.wiley.com/legacy/wileychi/eac/pdf/A0608-W.PDF. Hakupäivä 17.1.2016.

6. Tekra. Saatavissa: http://www.tekra.com/. Hakupäivä 1.5.2016.

7. Elcometer. Saatavissa: http://www.elcometer.com/en. Hakupäivä 1.5.2016.

8. Vilukela, Pentti – Ristimäki, Seija – Spännäri, Toni 2007. Painoviestinnän tekniikka. Otavan Kirjapaino Oy.

9. Rönkä, Kari 2015. PrintoCent Designer's Handbook. Kello: Neficon Finland Oy.

10. Niiranen Sini 2011. Plasmakäsittelyn nestekidepolymeerin ja silikoni välisen adheesion heikkeneminen kiihdytetyissä ympäristörasitustesteissä. Diplomityö. Saatavissa: https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/3674/urn100422.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Hakupäivä 1.5.2016.

11. Henniker plasma. Saatavissa: http://plasmatreatment.co.uk/. Hakupäivä 1.5.2016.

12. AST Products. Saatavissa: http://host.web-print-design.com/ast/index-2.html. Hakupäivä 1.5.2016.

13. Electro Tech. Saatavissa: http://www.etind.com/. Hakupäivä 1.5.2016.

14. Tantec. Saatavissa: http://www.tantec.com/. Hakupäivä 1.5.2016.

15. Määttä, Harri 2012. T762903 Painettavan elektroniikan valmistusmenetelmät. Opintojakson luentomateriaali 2012. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.

16. Neff, Joel Emerson 2009. Investigation of the effects of process parameters on performance of gravure printed ITO on flexible substrates. A Thesis. Georgia Institute of Technology. Saatavissa: https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/29625/neff_joel_e_200908_mast.pdf. Hakupäivä 10.5.2016

17. Saurio, Antti 2013. Pilotsyväpainokoneen käyttöönotto. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu, paperitekniikan koulutusohjelma. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/59200/Saurio_Antti.pdf?sequence=1. Hakupäivä 11.2.2016.

18. Hösel, Markus – Krebs, Frederik C 2013. Large-scale Roll-to-Roll Fabrication of Organic Solar Cells for Energy Production. Technical University of Denmark. Denmark. Saatavissa: http://orbit.dtu.dk/files/89079576/phdthesis_markushoesel_final_online.pdf. Hakupäivä 1.5.2016.

19. Plastic photovoltaics. Saatavissa: http://plasticphotovoltaics.org/. Hakupäivä 1.5.2016.

20. Janghoon, Park – Jinwoo, Seong – Hyunkyoo, Kang – Keehyun Shin 2011. A Study on Model Development of the Slot-die Coating Process through the Statistical Analysis. Department of Mechanical Desing, Konkuk University, Seoul, Korea. Saatavissa: http://ieeexplore.ieee.org.ezp.oamk.fi:2048/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6145912&tag=1 (vaatii käyttäjälisenssin). Hakupäivä 1.5.2016.

21. Holo East. Saatavissa: http://www.holoeast.com/. Hakupäivä 1.5.2016.

22. RK Printcoat instruments. K Control coater & K paint applicator. United Kingdom. Saatavissa: http://www.rkprint.co.uk/wp-content/uploads/2011/01/KControlCoater.pdf. Hakupäivä 1.5.2016.

23. PrinLab - A development laboratory for printed electronics. 2015. Oulu University of Applied Sciences. Saatavissa: http://www.oamk.fi/hankkeet/prinlab/. Hakupäivä 1.5.2016.

24. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Saatavissa: http://www.vtt.fi/. Hakupäivä 8.5.2016.

25. Kaisto, Ilkka 2015. Director of PrintoCent, VTT. PrintoCent esittely 3.12.2015.

26. PrintoCent. Saatavissa: http://www.printocent.net/index.html. Hakupäivä 8.5.2016.

27. DuPont Teijin Films 2006. MELINEX® ST506 Datasheet. Chester USA. Saatavissa: http://www.dupontteijinfilms.com/filmenterprise/Datasheet.asp?ID=271&Version=US. Hakupäivä 1.5.2016.

28. Paakkolanvaara, Mikko. R2R facilities. VTT Technical Research Centre of Finland. Saatavissa: http://www.vtt.fi/files/services/ele/R2R_facilities_Paakkolanvaara.pdf. Hakupäivä 1.5.2016.

LIITTEET

DuPont Teijin Films™

MELINEX® ST506

Product Description

MELINEX® ST506 is a crystal clear, high gloss, heat stabilized polyester film. It is pretreated on both sides for improved adhesion. It can be overprinted with a wide range of solvent-based graphic inks and varnishes, silver conductive and dielectric inks. It is ideally suited for graphic and certain circuitry layers in membrane touch switches.

Our process of continual improvement in quality and specification now enables us to provide the following properties and benefits:

* Heat stabilized to give excellent dimensional stability at temperatures up to 302°F.
* Excellent adhesion to a wide range of solvent based inks, graphics inks and varnishes, silver conductive inks and dielectrics.
* Excellent durability and toughness giving long lasting switches, particularly when compared with polycarbonate.
* Greatly superior solvent resistance to polycarbonate, making MELINEX® ST506 particularly suitable for use in many industrial applications.

Approvals

UL 94 VTM-2 - for 300 - 700 gauge (0.073 - 0.18mm)

Typical Properties

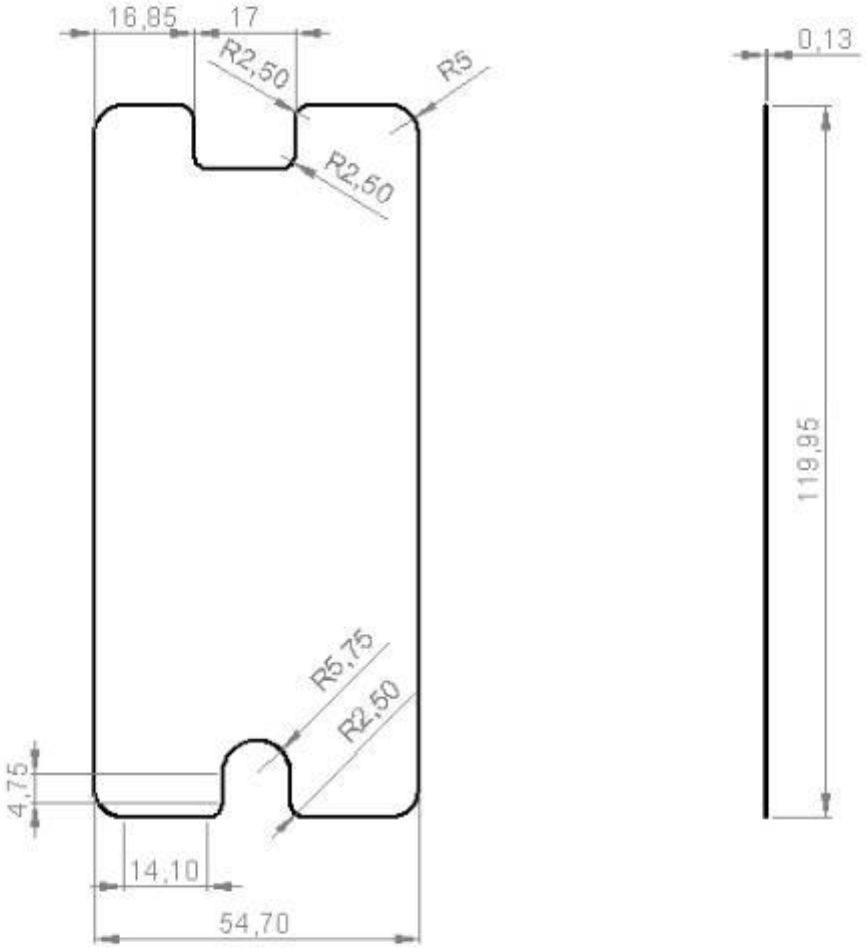
Available Thickness [Gauge]
500; 700

Property	Thickness	Value	Units	Test
ELECTRICAL				
Dielectric Constant		2.9		ASTM D150
Dielectric Strength		3000	volts/mil	ASTM D149
Surface Resistivity		10^13	Ohms/sq	ASTM D257
Volume Resistivity		10^15	Ohms-m	ASTM D257
OPTICAL				
Gloss 60 Degrees		150		ASTM D1003
Haze	500	0.7	%	ASTM D1003
Haze	700	0.9	%	ASTM D1003
Total Light Transmission (TLT)	500	91.0		ASTM D1003
Total Light Transmission (TLT)	700	90.0		ASTM D1003
PHYSICAL				
C.O.F. (static)		<0.70		ASTM D1894
Flexural Strength	500	>20,000	cycles	ASTM D2176
Flexural Strength	700	>15,000	cycles	ASTM D2176
THERMAL				
Coefficient of Hygroscopic Expansion		6X10^ -6	in/in %RH	40% - 80% RH
Coefficient of Thermal Expansion		10x10^6	in/in/°F	(68 - 122°F)
Melting Point (PEAK)		265	°C	
Shrinkage MD (150°C)	500 - 700	0.15	%	Unrestrained @ 150°C/30 min
Shrinkage TD (150°C)	500 - 700	0.15	%	Unrestrained @ 150°C/30 min

MALLINNETTU IPHONE 5 -KALVO

LIITE 2

Rev	Muutos	Pvm	Suunnittelija



Yleistoleranssi	Asiakas	Suunnittelija Oskari Mäkimartti	Pvm
Massa	Projekti	Tarkastaja	Pvm
Mittakaava A4 1:1	Työnumero	Hyväksyjä	Pvm
OULUN SEUDUN AMMATTIKORKEAKOULU Tekniikan yksikkö	Nimitys iPhone 5s HC film	Piirustusnumero	Reunalo